



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

LAS FIBRAS ÓPTICAS COMO TESTIGOS DE AGRIETAMIENTO EN LA MAMPOSTERÍA
DE TABIQUE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ARACHELYS HURTADO DE MENDOZA LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. SERGIY KHOTYAINTEV
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ceballos Herrera Daniel Enrique

Secretario: Dr. Martynyuk Oleksandr

Vocal: Dr. Khotyaintsev Sergiy

1 er. Suplente: Dr. Martínez López José Ismael

2 d o. Suplente: M.I. Zúñiga Bravo Miguel Ángel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Khotyaintsev Sergiy

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, que a pesar que ya no está conmigo fue un pilar importante en mi vida, espero que esté orgullosa de mí.

A mi padre por su apoyo incondicional y por estar siempre ahí.

A mi hermana Airila, por apoyarme en todo y por su infinito cariño.

A mi hijo Liam, por ser el motor impulsor en mi vida, por darme esa fuerza que a veces pienso que no tengo. Te amo mi niño.

A mi tutor Dr. Sergiy Khotyaintsev, por su dedicación, su paciencia, su apoyo y sus consejos para la realización de este trabajo.

A mis amigos que de una forma u otra siempre me apoyaron y estuvieron al pendiente.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM y la Facultad de Ingeniería por la formación adquirida.

A la DGAPA –PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma de proyecto de innovación tecnológica “Sistema de fibra óptica para monitoreo estructural de edificios históricos: Desarrollo e implementación de un prototipo en el antiguo Templo San Agustín” con número de referencia IT101618.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico en forma de beca para la realización de mis estudios de maestría.

RESUMEN

La detección temprana de daños estructurales en edificaciones es muy importante, ya que permite a los expertos tomar las medidas preventivas oportunas, minimizando así los daños y evitando el colapso parcial o total de las estructuras e incluso la pérdida de vidas humanas. Este trabajo fue motivado por la necesidad de preservar edificios de relevancia histórica y valor artístico en México. Siguiendo algunos trabajos previos sobre el empleo de las fibras ópticas como testigos de agrietamiento en diversos elementos estructurales, el presente trabajo se centra en la determinación del tipo de fibra óptica más adecuado para la detección de grietas en la mampostería de tabique.

Por medio de una serie de experimentos con cuatro tipos de fibras ópticas multimodales con el núcleo y revestimiento de sílice y recubrimiento externo de Acrílico y Tefzel, (AFS105/125Y, AFS50/125Y, FP200ERT y FG200LEA) y dos tipos de pegamento (Acrílico y Epoxy) para adherir la fibra óptica a los tabiques, se estableció una relación estadísticamente significativa entre los parámetros de la fibra óptica y la abertura de grieta a la cual esta fibra óptica se rompe.

Los resultados obtenidos serán de utilidad para la implementación práctica de respectivos sistemas de monitoreo de salud estructural de las edificaciones de mampostería de tabique, tales como diversos edificios históricos en México y otros países.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4. METODOLOGÍA.....	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE FIBRAS ÓPTICAS	6
2.1. FIBRA ÓPTICA	6
2.1.1 REFRACCIÓN DE LA LUZ.....	7
2.1.2. REFLEXIÓN TOTAL INTERNA.....	8
2.1.3. MODOS DE PROPAGACIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA.....	10
2.1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS DE ACUERDO A LOS MODOS DE PROPAGACIÓN ...	12
2.1.5. ATENUACIÓN DE LA POTENCIA LUMINOSA EN LA FIBRA ÓPTICA.....	14
2.1.6. DISPERSIÓN TEMPORAL DE LA ENERGÍA DE LA SEÑAL.....	15
2.1.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS	17
2.1.8. PROBABILIDAD DE ROTURA DE UNA FIBRA ÓPTICA. MODELO DE WEIBULL	19
2.1.9 PRUEBAS A LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	21
2.2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA.....	21
2.2.1 EMISORES ÓPTICOS	22
2.2.2 LED	22
2.2.3 LÁSER.....	23
2.2.4. COMPARACIÓN ENTRE DIODOS LÁSER Y DIODOS LEDS	24
2.2.5 RECEPTORES ÓPTICOS.....	24
2.3. APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS EN TELECOMUNICACIONES E INSTRUMENTACIÓN	25
2.3.1. INTERFERÓMETRO DE MICHELSON	27
2.3.2. INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER	28
2.3.3. INTERFERÓMETRO FABRY-PEROT	29
2.4. ANTECEDENTES DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN LA UNAM	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LA RESPECTIVA INSTALACIÓN	35
3.1. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	35
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	36
3.2.1. SUBSISTEMA MECÁNICO	37
3.2.2 SUBSISTEMA ÓPTICO	38
3.3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	42
3.4. CONSIDERACIONES SOBRE EL PEGAMENTO PARA SUJETAR LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	43
3.5. PRUEBAS PRELIMINARES: VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO	47
3.5.1 EXPERIMENTOS CON DIFERENTES LONGITUDES DE FIBRA PEGADAS A LOS TABIQUES	47
3.5.2 EXPERIMENTO CON FIBRA JUMPER MULTIMODO 62.5/125	49
3.5.3 EXPERIMENTO CON FIBRA ÓPTICA FP200ERT	51
3.5.4 EXPERIMENTO CON FIBRA ÓPTICA DE RECUBRIMIENTO DE POLYIMIDE (POLIAMIDA).....	52

3.6 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	53
3.6.1. MEDIDA DE TENDENCIA CENTRAL	55
3.6.2. MEDIDAS DE DISPERSIÓN	56
3.6.3 ASIMETRÍA.....	57
3.6.4. APUNTAMIENTO.....	58
3.7. CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	60
4.1. EXPERIMENTOS FIBRA AFS105/125Y CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE	60
4.2. EXPERIMENTO FIBRA AFS50/125Y CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE	61
4.3. EXPERIMENTO FIBRA AFS105/125Y CON PEGAMENTO ACRÍLICO	63
4.4. EXPERIMENTO FIBRA AFS50/125Y CON PEGAMENTO ACRÍLICO	64
4.5. EXPERIMENTO FIBRA FG200LEA CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE.....	65
4.6. RESUMEN Y COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TODOS LOS CASOS	67
4.7. CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXOS	79
ANEXO A	79
ANEXO B.....	80
ANEXO C.....	81
ANEXO D	82
ANEXO E.....	83
ANEXO F.....	84
ANEXO G	85
ANEXO H	86
ANEXO I.....	87
ANEXO J.....	88
ANEXO K	89
ANEXO L.....	90

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La fibra óptica revolucionó la industria de las telecomunicaciones, proporcionando un mayor rendimiento y enlaces de telecomunicaciones más fiables con una disminución del costo de ancho de banda.

Paralelamente a estos desarrollos, la tecnología de sensores de fibra óptica ha aprovechado de la tecnología asociada a la industria de la optoelectrónica y comunicaciones de fibra óptica. Y dado que los precios de los componentes se han reducido y las mejoras de calidad se han hecho, los sensores de fibra óptica han ido desplazando a los sensores tradicionales para medir diversos parámetros físicos tales como la temperatura, presión, vibración, viscosidad, índice de refracción de líquidos y otros [1].

Los sensores de fibra óptica presentan múltiples ventajas frente a los sensores eléctricos, algunas de ellas son:

- Inmunidad intrínseca a la interferencia electromagnética.
- Baja conductividad térmica.
- Capacidad de operar a bajas y altas temperaturas.
- Ausencia de conductividad eléctrica.
- Alta resistencia a la corrosión química.
- Seguridad contra riesgos de fuego o explosión.
- Alta sensibilidad.
- Tamaño pequeño.

Los sensores de fibra óptica de tipo intensidad son relativamente sencillos y económicos en comparación con otro tipo de sensores y por esto tienen mayores y mejores perspectivas de su uso práctico de forma masiva.

Hay una variedad de aplicaciones donde es atractivo utilizar conjuntos grandes de sensores de tipo intensidad en forma de arreglos o redes, con la finalidad de conocer la cantidad física de interés en múltiples puntos de un objeto o un área.

Sin embargo, los sensores basados en fibra óptica y los arreglos o redes de dichos sensores es un área que aún se encuentra en etapa de investigación. El desarrollo de varios sensores particulares presenta muchos retos y requiere de investigaciones teóricas igual que de trabajo aplicado para lograr la implementación de los sistemas, arreglos y redes de dichos sensores.

La causa más frecuente de falla en la mampostería (entendiendo como falla a la alteración del nivel de desempeño o a la condición por la cual deja de cumplir una función) son las grietas en los muros, y no

el colapso. La detección e indicación automática de daño en forma de grietas a las edificaciones, con arreglos de fibras ópticas utilizadas como testigos o indicadores de grietas presenta un gran interés económico social, ya que permite a los expertos tomar las medidas preventivas oportunas, minimizando así los daños económicos y evitando el colapso parcial o total de las estructuras e incluso la pérdida de vidas humanas.

Factores que amenazan los edificios nuevos y antiguos:

- Bajo control de calidad durante el proceso constructivo
- Degradación de los materiales
- Sobrecarga
- Incendios
- Hundimiento de la tierra
- Terremotos

Una grieta aparece cuando las deformaciones del muro exceden la deformación de agrietamiento de la mampostería. No existe una clasificación universal y absoluta de la anchura de grietas que pueda considerarse peligrosa, ya que depende de la función de la estructura, tipo de acción, forma de grieta, entre otras. Una clasificación de anchura de grietas según el nivel de exposición de la estructura se presenta en la tabla 1 (Grimm, 1988) [2].

Tabla 1: Clasificación de grietas según el nivel de exposición de la estructura [2].

Categoría		Anchura de grieta AG, mm
Muy finas	Impermeable	$AG < 0.15$
Finas	Exposición exterior	$0.15 < AG < 0.30$
Mediano	Exposición interior-húmeda	$0.30 < AG < 0.50$
Extenso	Exposición interior-seca	$0.50 < AG < 0.60$
Severo		$AG > 0.60$

La manera más sencilla para medir la anchura es mediante la comparación de la grieta con marcas de diferentes anchuras pintadas en láminas plásticas (llamado comparador de grietas o grietómetro). Las mediciones se mejoran en precisión si se usan lentes de aumento. Se pueden observar imágenes de diferentes tipos de grietas en Anexo A.

Se han propuesto varios criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería por sismo (ver tabla 2). Se recomienda consultar esta referencia para clasificar el estado de la edificación dañada.

Tabla 2: Criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería después de un sismo [2].

Grado	Estado de daño
I	Grietas pequeñas, difícilmente visibles sobre la superficie del muro. Grietas mínimas en castillos y dalas de confinamiento. Grietas con anchuras menores que 0,2 mm.
II	Grietas claramente visibles sobre la superficie del muro, con anchuras entre 0,2 y 1 mm.
III	Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas. Grietas grandes en la superficie del muro, con anchuras entre 1 y 3 mm.
IV	Agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas, o en muros de relleno ligados a marcos; grietas con anchuras mayores que 3 mm. Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas.
V	Desprendimiento de partes de piezas. Aplastamiento local de la mampostería. Prolongación del agrietamiento diagonal en castillos o en dalas (anchuras de grietas superiores a 1 mm). Agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas. Deformación, inclinación horizontal o vertical apreciable del muro.

Este trabajo fue motivado por la necesidad de preservar edificios de relevancia histórica y valor artístico en México. Siguiendo algunos trabajos previos realizados en la UNAM, con fibras ópticas embebidas o pegadas a la superficie de los elementos estructurales, se centró la investigación en una técnica de fibra óptica simple y barata para la detección de daños estructurales con el fin de encontrar el tamaño de la grieta a la cual la fibra óptica se rompe.

Dicho método fue desarrollado por el grupo de investigación a cargo del Dr. Sergiy Khotyaintsev perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el cual consiste en un sistema de fibras ópticas para el monitoreo de las estructuras de concreto, tabique, etc; con fibras ópticas embebidas o pegadas a la superficie de los elementos estructurales [3-5]. Entre los problemas no resueltos se encuentra cierta incertidumbre sobre los tipos de fibras ópticas más óptimos para aplicar a diferentes materiales, así como su relación entre el tipo y parámetros de la fibra óptica con la abertura de la grieta, a la cual se rompe la fibra óptica pegada al elemento estructural de interés. El presente proyecto de tesis de maestría aborda este problema.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio comparativo de algunos tipos de fibras ópticas de sílice como testigos o indicadores de grietas de mampostería de tabique. Establecer una relación cuantitativa entre, por un lado, el diámetro de la fibra óptica, el material de su envoltura (recubrimiento externo) y el tipo de pegamento que une a la fibra al tabique y, por otro lado, la abertura de la grieta en la mampostería de tabique a la cual esta fibra óptica se rompe.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el estado de arte de la tecnología de fibras ópticas y sus aplicaciones en las telecomunicaciones e instrumentación, con un enfoque especial al monitoreo de la salud estructural de edificaciones.
2. Desarrollar la metodología de estudio experimental de las propiedades de fibras ópticas utilizadas como indicadores (testigos) de fallas estructurales en forma de grietas en los elementos de mampostería de tabique.
3. Diseñar e implementar una instalación para la realización de respectivos estudios experimentales.
4. Investigar experimentalmente las características de algunos tipos de fibras ópticas como testigos (indicadores) de fallas estructurales.
5. Interpretar los resultados de estudios e investigaciones realizadas, derivar las respectivas conclusiones y recomendaciones.

1.4. METODOLOGÍA

En el desarrollo de la tesis, en primer término, se ubicarán las fuentes de información donde se presenten los avances técnicos y científicos en el área de sistemas de fibra óptica para las telecomunicaciones e instrumentación, con un enfoque especial al área emergente de monitoreo de estructuras con los arreglos y redes de fibras ópticas.

En segundo término, se analizarán los aspectos fundamentales de las tecnologías objeto de estudio: las fibras ópticas, sus características y funcionamiento, los métodos aplicables al análisis, síntesis y diseño de elementos y sistemas de fibra óptica. Como resultado de dicho análisis, se identificarán los problemas particulares a desarrollar, las variables de estudio.

Como tercera fase, con base en los resultados de las actividades anteriores, se desarrollará la metodología de estudios teóricos y experimentales sobre el tema de la tesis.

La cuarta fase consistirá en el diseño e implementación de una instalación de laboratorio para la realización de estudios experimentales sobre el presente tema.

La quinta fase consistirá en el desarrollo de ensayos experimentales y el tratamiento estadístico de los resultados.

La sexta fase consistirá en el análisis de los resultados y desarrollo de las conclusiones generales de este trabajo.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE FIBRAS ÓPTICAS

2.1. FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un medio físico compuesto de filamentos de vidrio o plástico transparente y que transporta señales sobre la base de la transmisión de luz. Se comporta como una guía de onda, lo cual permite la propagación de ondas electromagnéticas longitudinalmente. Por tanto, una vez que la luz es insertada por uno de los extremos de la fibra, circula siempre en su interior reflejándose o rebotando contra las paredes, hasta el extremo opuesto [6].

Las fibras ópticas se componen de tres estructuras concéntricas principales: núcleo (*core*), revestimiento (*cladding*) y recubrimiento (*coating/jacket*). El filamento de la fibra óptica está compuesto por dos capas de vidrio cada una de un índice de refracción distinto. El núcleo presenta un índice de refracción mayor que el de revestimiento, razón por la cual la luz introducida al interior de la fibra se propaga y se mantiene confinada en el núcleo. Esto se basa en el principio de reflexión Total Interna [7-9].

Entre las principales características de las fibras ópticas se encuentran la inmunidad a la interferencia electromagnética, inmunidad a cortos eléctricos, bajas pérdidas de potencia, grandes distancias entre repetidores de la señal, amplio ancho de banda, transporte de la información a velocidades cercanas a la de la luz, entre muchas otras. La principal ventaja de las fibras ópticas para ser empleadas como sensores es la inmunidad al ruido electromagnético, lo que genera a tener señales de sensado con niveles de señal a ruido muy grandes, esto es, señal de sensado con poco ruido o incluso sin ruido [10]. Así como presenta sus beneficios la fibra óptica presenta varios factores que pueden afectar a la buena transmisión de la señal y son:

- **Atenuación:** Se da debido a las distancias que atraviesa la señal de luz, por lo que va perdiendo potencia óptica conforme va aumentando su distancia a causa de la dispersión, absorción, etc. Lo que va a conllevar que una señal demasiado débil receptada se confunda con el ruido que existe en el fondo y por ende no pueda recuperar la información de una manera íntegra.
- **Dispersión:** Se da debido a la distancia que recorre la luz en la fibra óptica, ya que estos haces de luz se amplían o extienden dentro de la fibra por lo que causan que la capacidad de transporte de información sea limitada cuando haya largas distancias o se encuentre a elevadas velocidades de bits.

Debido a sus bajas pérdidas, su capacidad para transportar una gran cantidad de información, su pequeño tamaño, su poco peso, bajo costo, su inmunidad a la interferencia electromagnética, su

inigualable seguridad en la transmisión de las señales, así como la abundante disponibilidad de las materias primas necesarias para su creación, las fibras ópticas se han convertido en los medios principales de comunicación.

2.1.1 REFRACCIÓN DE LA LUZ

En términos de la Óptica Geométrica, la propagación de la luz en una fibra se basa en el fenómeno de la reflexión total interna.

La refracción de la luz en el interfaz de dos medios dieléctricos transparentes se describe por la Ley de Snell conocida así en honor al científico que la propuso y verificó, Willebrord Snell Van Royen, haciendo una representación de la luz como rayos, realizó un estudio del comportamiento de la luz al viajar del medio en el que se propaga de índice de refracción (n_i) a otro de mayor índice de refracción (n_t). En la representación de la luz como rayos, es conveniente trazar la normal al plano de incidencia, ya que con respecto a ésta se miden los ángulos tanto de incidencia (θ_i), el ángulo refractado o transmitido (θ_t) y el ángulo reflejado (θ_r) [6].

Cuando $n_i < n_t$, es decir, cuando la luz está viajando inicialmente dentro del medio de menor índice de refracción, la ley de Snell establece que $\text{sen}\theta_i > \text{sen}\theta_t$, y dado que en todos los puntos la misma ecuación es positiva entre 0° y 90° , entonces $\theta_i > \theta_t$. Esto significa que el rayo de luz al cambiar de medio de transmisión de un índice de refracción menor a uno mayor se flexiona hacia la normal. También éste fenómeno es aplicable en sentido contrario, esto es, cuando el rayo de luz viaja de un medio con índice de refracción mayor a uno menor, el rayo de luz se flexiona alejándose de la normal. Por lo tanto, la trayectoria del rayo de luz es la misma cuando entra que cuando sale de un medio a otro. Una representación de la ley de Snell se muestra en la figura 1.

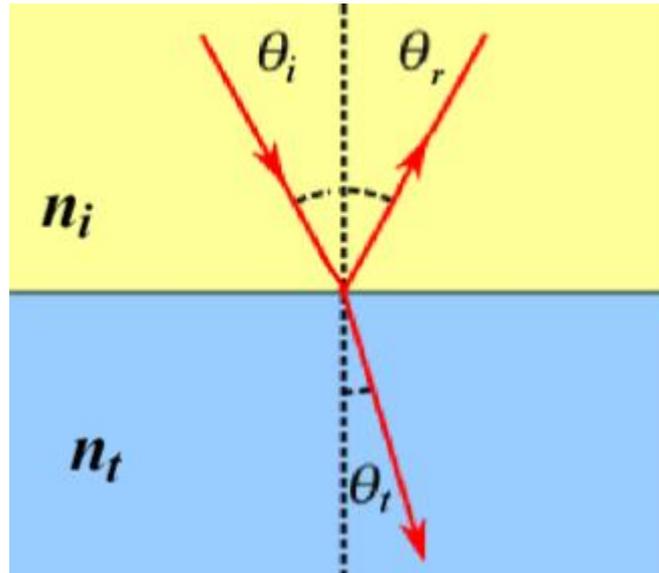


Figura 1: Ley de Snell [6].

La ley de Snell está denotada por la ecuación (1):

$$n_i \text{sen} \theta_i = n_t \text{sen} \theta_t \quad (1)$$

2.1.2. REFLEXIÓN TOTAL INTERNA

En el caso en que n_2 es mayor que n_1 , cuando la luz pasa desde el aire con índice de refracción n_1 al vidrio o al agua con índice mayor n_2 , el rayo refractado se curva y se acerca a la normal tal como indica la figura 2. En caso contrario, es decir, si el rayo de luz pasara del medio 2 al medio 1, se alejaría de la normal. Cuando el rayo de luz pasa de un medio de mayor índice de refracción a uno de menor índice de refracción, el haz de luz se aleja de la normal, para este caso puede existir un determinado ángulo de incidencia al que le corresponde uno de refracción de 90° y entonces el rayo refractado saldrá a través de la superficie de separación de ambos medios. Este ángulo de incidencia es el llamado ángulo crítico. Para ángulos de incidencia mayores al ángulo crítico, el ángulo de refracción será mayor de 90° y el rayo no será refractado sino reflejado, puesto que no pasará de un medio a otro, y se produce una reflexión total interna [6-7]. En la figura 2 se muestra este fenómeno.

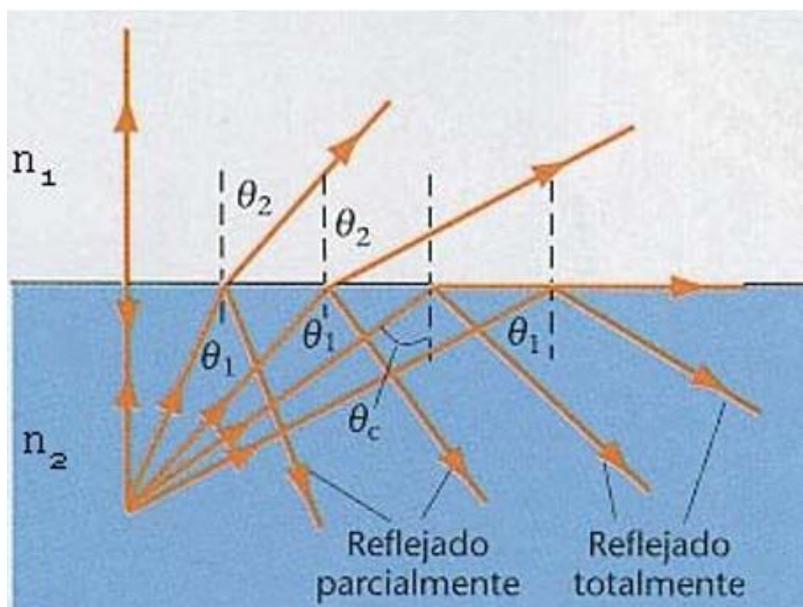


Figura 2: Reflexión Total Interna [6].

Empleando el fenómeno de reflexión total interna es como se explica el comportamiento de la transmisión de luz a través de una fibra óptica. Un cilindro de vidrio el cual está rodeado de un medio cuyo índice es n_2 , sea aire, desde el cual incide un haz de luz, el haz de luz transmitido del medio (n_2) al cilindro de vidrio (n_1), llega a las paredes del cilindro desde adentro y se reflejará total e internamente siempre que el ángulo de incidencia sea mayor que

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Cuando un rayo de luz incide en la fibra óptica, la onda lumínica sufre un cambio en su medio de propagación, el fenómeno que permite esto se conoce como refracción, a su vez el rayo incidente para poder ser propagado en la fibra tiene que incidir con un ángulo menor al ángulo crítico de reflexión. Al parámetro que, conjugado con estos fenómenos físicos, refracción y reflexión, delimita el paso de los pulsos lumínicos capaces de ser propagados por el núcleo de una fibra óptica es conocido como apertura numérica. La apertura numérica se define como el valor numérico del seno del máximo ángulo que posibilita el acoplamiento de la onda lumínica desde el exterior de la fibra óptica hasta su interior [7].

$$AN = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (3)$$

2.1.3. MODOS DE PROPAGACIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA

Para que la luz se guíe se requiere, además, que formen el interior de la guía de onda una distribución de campo cuya componente transversal sea estacionaria. Se llama modo a cada una de las distintas "formas" en que puede conseguirse tal condición. Su expresión matemática se obtiene resolviendo las ecuaciones de Maxwell correspondientes, con las condiciones de contorno dictadas por el confinamiento cilíndrico a que se ve sometida la radiación en una guía de onda circular como es la fibra óptica [9].

El cálculo exacto de la distribución de modos en guías de ondas circulares es bastante complicado, a causa del confinamiento existente en dos direcciones ortogonales. Los modos que se originan por esta circunstancia difieren bastante de los simples TE y TM que surgen en guías de ondas (GO) planas (confinadas en una sola dimensión). Existe una aproximación (modos débilmente guiados o *weakly-guided modes*, WGM) que simplifica el cálculo de forma notable.

Sea una GO plana con dirección de propagación en el eje z , confinada solamente en la dimensión x . Los modos obtenidos tienen una componente E_z o H_z nulo, es decir, son transversales eléctricos (TE) o magnéticos (TM). En la figura 3 se muestra la distribución de campo de los cuatro primeros modos TE de una GO plana simétrica. El campo tiene una variación armónica en el interior del núcleo, además no está estrictamente confinado al mismo, sino que aparece una componente residual en la cubierta, llamada campo evanescente, que se atenúa exponencialmente con la distancia. Obsérvese que la distribución de campo se desplaza hacia la parte externa al aumentar el orden del modo y que la componente evanescente crece también.

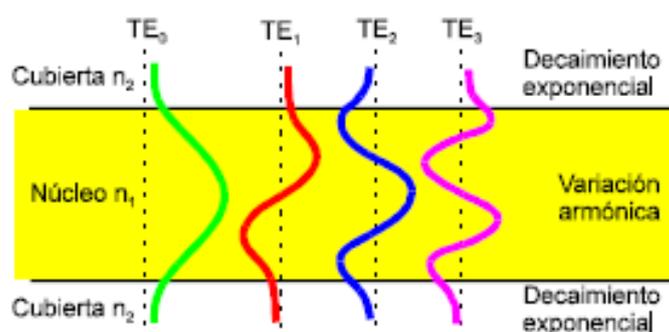


Figura 3: Modos en una guía de onda plana simétrica [8].

Modos de cubierta

La cubierta no tiene espesor infinito. Si el campo evanescente no se ha hecho nulo (en realidad despreciable) cuando se alcanza la parte externa de la cubierta, el salto de índice de ésta puede llegar a ser condición de contorno, y aparecen modos que se propagan por la cubierta. Este fenómeno se da tanto en GO planas como en fibras ópticas. El problema surge porque ni los modos de núcleo ni los de cubierta están estrictamente confinados “a su terreno”, por lo que puede surgir un acoplamiento entre ellos, que generalmente se traduce en una pérdida de potencia de los modos guiados en el núcleo, en especial los de orden más alto.

Modos con pérdidas o leaky

A distancias cortas, la distinción entre modos guiados y no guiados se hace tenue. Una buena parte de modos inclinados no están bien confinados, y van perdiendo potencia durante su propagación.

En los modos *leaky* se cumple que:

$$kn_2 > \beta \quad (4)$$

Donde k es el vector de onda, n_2 es índice de refracción del revestimiento y β es la constante de propagación.

La mayoría de modos de este tipo desaparece al cabo de unos cuantos cm de fibra óptica, pero algunos con bajas pérdidas pueden llegar hasta 1 km. En trayectos cortos, una parte bastante notable de la potencia óptica transportada por la fibra puede deberse a estos modos.

Modos linealmente polarizados

La primera consecuencia de la adopción del concepto WGM es la aparición de un nuevo tipo de modos denominados modos linealmente polarizados o modos LP. A diferencia de los anteriores, estos modos no son soluciones directas de las Ecuaciones de Maxwell (a excepción del modo fundamental), sino combinaciones lineales de varias soluciones. Lo que sucede es que, en WGM, los modos HE y EH son “casi” transversales, y en el conjunto de soluciones de modos EH, HE, TE y TM aparecen grupos que tienen constantes de propagación casi idénticas (idénticas en la aproximación). Se dice entonces que los modos están degenerados.

Resulta muy conveniente agrupar tales modos generados como combinación lineal con una constante de propagación común ya que, a todos los efectos, la transmisión por cualquiera de los modos del grupo se va a comportar de la misma manera, con independencia del modo concreto que la transporte.

En la figura 4 se observan los primeros cuatro modos LP.

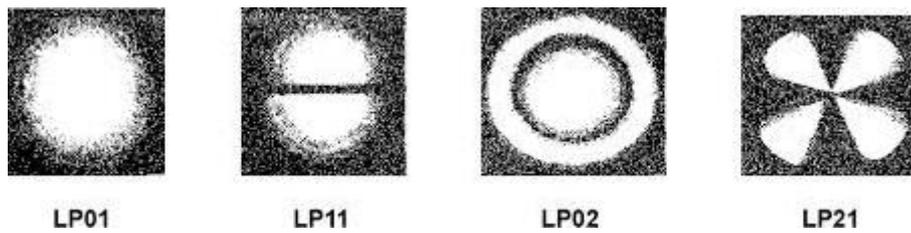


Figura 4: Primeros cuatro Modos Linealmente Polarizados [7].

2.1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS DE ACUERDO A LOS MODOS DE PROPAGACIÓN

El perfil de la fibra óptica se define para la sección transversal mínima, como la distribución de los índices de refracción a lo largo de un diámetro de una fibra óptica. El índice de refracción del revestimiento siempre es constante, por tanto, se puede clasificar las fibras ópticas en función de su perfil de índice de refracción del núcleo en perfil gradual y perfil escalonado. Las fibras con perfil escalonado podemos encontrarlas en dos diferentes comportamientos, monomodo o multimodo. En cambio, las fibras de perfil gradual solo existen para comportamiento multimodo [6-7]. Ver figura 5.

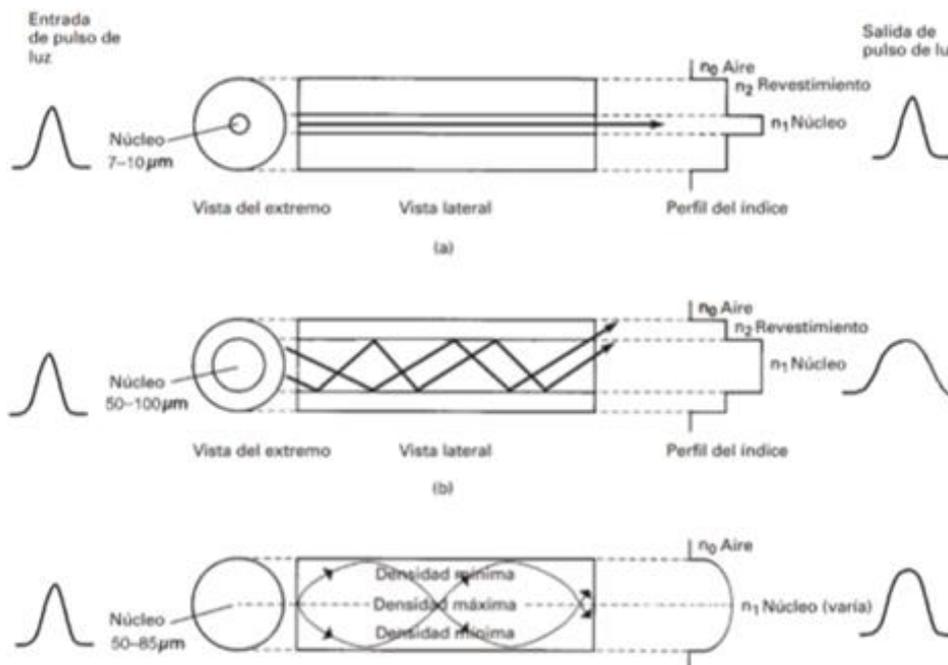


Figura 5: Perfil de índice a) monomodo b) multimodo índice escalonado c) multimodo índice gradual [7].

Perfil gradual: El índice de refracción del núcleo no permanece constante, presentando una sección cóncava con una forma acampanada, de manera que el valor del índice de refracción en el centro del

núcleo de la fibra es máximo y decrece a medida que se aproxima a su periferia. En la frontera del núcleo y revestimiento se igualan los valores de ambos índices de refracción, a partir de este punto y a lo largo de toda su sección permanece constante el valor del índice de refracción del revestimiento.

Perfil escalonado: En estas fibras ópticas, el valor del índice de refracción del núcleo permanece constante, presenta una sección recta, de manera que el valor del índice de refracción a lo largo de toda la sección del núcleo de la fibra óptica es el mismo. En la frontera entre el núcleo y el revestimiento el valor del índice de refracción decrece bruscamente y la fibra óptica presenta una sección en escalón con dos secciones rectas. El valor del índice de refracción en el núcleo es siempre mayor al valor del revestimiento. Este tipo de fibras tiene dos tipos fundamentales de comportamiento monomodo y multimodo. La diferencia entre ambos radica que en las fibras ópticas monomodo se propaga el modo fundamental o modo de orden inferior únicamente por el núcleo, mientras que en las fibras multimodo se propagan siempre varios modos: el fundamental y otros asociados o modos de orden superior [10].

Fibra óptica de índice escalonado multimodal

Cuando una fibra está construida de forma que el radio del núcleo es relativamente grande comparado con la longitud de onda que transporta, y además tanto el índice de refracción del núcleo como del revestimiento son constantes, este tipo de fibra es el denominado fibra de salto de índice o fibra de índice escalonado multimodo. El núcleo de estas fibras es homogéneo de diámetros de entre 50 y 150 μm y con un revestimiento cuyo diámetro es entre 100 y 125 μm respectivamente (en el caso de las fibras ópticas de sílice).

Fibra óptica de índice escalonado monomodal

Si el núcleo de una fibra llega a tener un diámetro tan pequeño, tal que las dimensiones se aproximen a la longitud de onda de la luz que se propaga en la fibra, entonces sucede que los efectos de difracción dominan, así que la luz solo puede propagarse a lo largo del eje de propagación de la fibra. La ventaja de las fibras ópticas monomodales para las comunicaciones y sensores de fibra es que la luz está espacialmente limitada a lo largo de la fibra. Para propósitos de comunicación, esto significa que el ancho de banda se incrementa enormemente ya que al propagar un pulso éste no tendrá diferentes caminos ópticos a través de la fibra para diferentes ángulos de incidencia. Para los sensores de fibra óptica, esto significa que el ruido en el sistema por los efectos provocados por múltiples modos se reduce.

Fibra óptica de índice gradual

Para reducir el número de modos y dispersión temporal de los modos propagándose a través de una fibra, es posible variar el índice de refracción a través de la región del núcleo. De esta manera el núcleo de la fibra actúa como una serie de lentes que enfocan la luz periódicamente a través de la fibra. Además, esta técnica reduce el alto número de modos individuales propagándose a través de una típica fibra multimodo de índice escalonado (cerca de 10,000) a cerca de 300 modos. De este modo se logra que los modos de orden superior experimenten el mismo camino óptico que los modos de índice inferior, ya que la disminución del índice de refracción a lo largo de la zona radial del núcleo y con mayor índice en la zona central del núcleo logran que los modos obtengan un balance espacial a lo largo de la fibra. Problemas como el ruido modal, alta sensibilidad a microcurvaturas y disminución del ancho de banda debido a una gran cantidad de modos han hecho que la industria de las comunicaciones emplee las fibras monomodales para el transporte de información [8, 10].

2.1.5. ATENUACIÓN DE LA POTENCIA LUMINOSA EN LA FIBRA ÓPTICA

Una de las variables más importantes en lo que se refiere a la fibra óptica, ya que la transmisión de luz no se realiza de forma eficiente, su energía se va desgastando, se le denomina atenuación. Esta atenuación se da por la influencia de diferentes factores como son: la absorción, la dispersión, etc.

En una fibra óptica de atenuación homogénea en la dirección la potencia luminosa va decreciendo en forma exponencial con la longitud:

$$P_1 = P_0 e^{-\alpha l} \quad (5)$$

En donde P_1 es la potencia luminosa de salida, P_0 es la potencia luminosa al inicio, l es la longitud que presenta la fibra y α es el coeficiente que representa la atenuación por longitud. Para calcular el coeficiente de atenuación que presenta la fibra se hace en dos puntos distintos L_1 y L_2 en donde se verifica sus potencias lumínicas P_1 y P_2 respectivamente y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{L_2 - L_1} \quad (6)$$

La atenuación característica de las fibras ópticas se mide en decibeles por unidad de longitud, típicamente en dB/km [9].

$$\alpha(dB/Km) = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (7)$$

La atenuación del enlace se puede calcular:

$$A = L * \alpha + N_e * \alpha_E + N_c * \alpha_C \quad (8)$$

Donde.:

A : Atenuación máxima de la sección [dB]

L : Longitud de la fibra óptica [Km]

α : Atenuación máxima por Km de la fibra óptica [dB/Km]

α_E : Pérdida por empalme [dB]

α_C : Pérdida en los conectores [dB]

N_e : Número de empalmes

N_c : Número de conectores

2.1.6. DISPERSIÓN TEMPORAL DE LA ENERGÍA DE LA SEÑAL

Uno de los principales problemas que se presentan en las fibras ópticas en Telecomunicaciones es la dispersión temporal, que es la variación de la velocidad de las componentes de la señal luminosa, la cual tiene por efecto el ensanchamiento en tiempo del pulso que es propagado en una fibra óptica a medida que viaja por ella, en los sistemas digitales de comunicación, o una limitación del ancho de banda, en los sistemas analógicas de comunicación. Si en una transmisión digital se utiliza una tasa de bits alta y la señal viaja una distancia considerable, la dispersión acumulada puede hacer que un pulso de información se ensanche tanto que invada las ranuras de tiempo correspondientes a los bits vecinos y ocasione pérdida de información (el aumento de tasa de errores, BER) por interferencia intersímbolo. Mientras mayor sea la distancia, la tasa de bits y el coeficiente de dispersión D , mayor será el BER [9-10].

Tipos de dispersión:

Dispersión Intermodal: Existe en fibras ópticas multimodales, es causada por la velocidad de grupo de diferentes modos electromagnéticos. En términos de óptica geométrica, es causada por los distintos trayectos que recorren los rayos que viajan a través de la fibra.

Dispersión Cromática: Está relacionada al espectro finito de una señal óptica. El espectro finito, a su vez, es causado por el ancho de banda finito de una señal, y el ancho espectral finito de una fuente óptica utilizada como portadora de la señal. Para un mismo modo electromagnético de la fibra óptica,

la velocidad de grupo depende de la longitud de onda. La Dispersión Cromática, D_C , está conformada por la dispersión de guíaonda y dispersión del material:

$$D = D_W + D_M \quad (9)$$

D_W : Coeficiente de dispersión de guíaonda

D_M : Coeficiente de dispersión del material.

Dispersión de guíaonda: Es causada por la variación de la velocidad de grupo de la onda para un modo particular en una guía de onda. Es influida por la forma del perfil de índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

$$D_W = -\frac{n_2 \Delta}{c \lambda} \left(v \frac{d^2(vb)}{dv^2} \right) \quad (10)$$

v : Frecuencia normalizada

Dispersión del material: Es causada por la variación del índice de refracción del material con la longitud de onda.

La constante de propagación de una onda plana monocromática depende de su longitud de onda, en un medio dispersivo homogéneo e infinito es:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n(\lambda) \quad (11)$$

$$D_M = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (12)$$

En la figura 6 se muestran tres curvas de dispersión las cuales corresponden a dispersión cromática D y sus contribuyentes: la dispersión de guíaonda D_W y dispersión del material D_M en una fibra monomodo. Donde λ_{ZD} es la longitud de onda de dispersión cero.

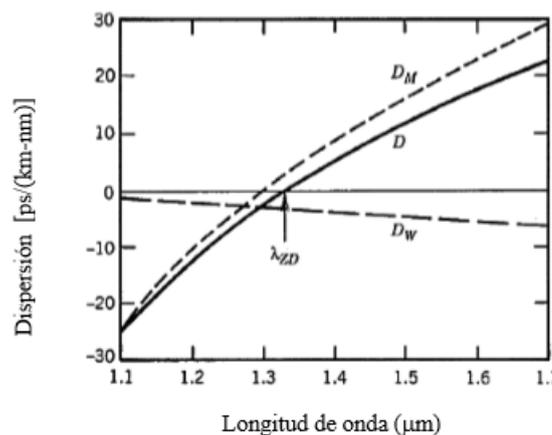


Figura 6: Dispersión total D y sus contribuyentes D_W y D_M para una fibra monomodo [10].

Dispersión por modos de polarización: Ocurre cuando hay diferencia en la velocidad de propagación de dos componentes de polarización ortogonal de un modo electromagnético en una fibra óptica.

Debido a que la fibra óptica posee una birrefringencia finita (tiene índices de refracción diferentes para polarizaciones diferentes de la luz) la velocidad de propagación para dos componentes de polarización ortogonal de un modo será diferente y por tanto habrá dispersión temporal de la señal [10].

En la ventana de transmisión de 1550 nm con una fibra convencional SMF-28 se tiene una dispersión aproximada de 17 ps/nm-km.

Dentro de las fibras monomodo se encuentran las fibras de dispersión controlada como son: DSF (Fibras de Dispersión Desplazada), DFF (Fibras de dispersión Plana), DCF (Fibras de Compensación de Dispersión).

DSF: Fueron realizadas para tener coeficientes de dispersión cero a la longitud de onda de mínima atenuación (1550 nm). El inconveniente es que la dispersión cero favorece fenómenos no lineales como la Automodulación de Fase, la Modulación de Fase Cruzada, el Mezclado de Cuatro Ondas, La Dispersión Estimulada de Raman y la Dispersión Estimulada de Brillouin.

DFF: Poseen un coeficiente de dispersión aproximadamente igual dentro de un amplio rango de longitudes de onda, desde 1450 a 1650 nm dentro de 1ps/nm-km.

DCF: Se caracterizan por tener un coeficiente de dispersión cromática elevado y de signo contrario al de la fibra estándar. Se utilizan en sistemas de compensación de dispersión, colocando un pequeño tramo de DCF para compensar la dispersión cromática en el enlace óptico.

Las fibras NZ-DSF surgieron para resolver los fenómenos no lineales de la fibra de dispersión desplazada, se caracterizan por tener valores de dispersión monocromática reducidos, pero no iguales a cero [11,12].

2.1.7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS FIBRAS ÓPTICAS

El desarrollo y aplicaciones importantes de las guías de ondas ópticas que acontecieron durante las últimas décadas dieron un fuerte impulso a la investigación de las propiedades mecánicas de las fibras ópticas. Lo que se procura es que la fibra no se rompa durante su instalación y operación. Para obtener buenos resultados en estos procedimientos es necesario asegurar cierta resistencia mínima de la fibra y la degradación de esta resistencia mínima (fatiga) con el tiempo, debido a diferentes fenómenos físicos y químicos bajo los factores del medio ambiente. Para verificar una dada resistencia se somete a la fibra al llamado ensayo de tensión de prueba continua. En el segundo término, se procura la tensión máxima que puede ser aplicada sobre la fibra para que no rompa en un período dado, en general de 25 años [13].

Cuando un material se somete a una carga o fuerza externa, sufrirá inicialmente una deformación de tipo elástica; si la carga sigue aumentando, la deformación pasará a ser de tipo plástica. Básicamente, se puede diferenciar la deformación elástica de la plástica, por el hecho de que la primera desaparece cuando deja de actuar la carga que la produjo, recuperando sus dimensiones originales. Por otra parte, la deformación plástica es una deformación permanente, es decir, aún cuando se retire la carga que la produjo, no recuperará sus dimensiones originales.

Dentro del rango de deformación elástica, existe una relación directa entre el esfuerzo y la deformación. El esfuerzo está dado por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (13)$$

Donde:

σ : Esfuerzo expresado en N/mm^2 , (psi)

F : La carga aplicada en N , (lb)

A : Área de la sección transversal de la probeta en mm^2 , ($pulg^2$)

La deformación producida por este esfuerzo está dada por la relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (14)$$

L_0 : Longitud inicial en mm (pulg)

L : Longitud deformada elásticamente en mm (pulg)

De aquí, se puede expresar la relación entre esfuerzo y deformación por medio de la ley de Hooke, que establece que un cuerpo elástico se estira proporcionalmente a la fuerza que actúa sobre él.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (15)$$

E : Módulo de elasticidad o módulo de Young, dado en N/mm^2 , (psi)

El módulo de Young también se conoce como módulo de elasticidad en tensión representa la resistencia contra la deformación “elástica”, siendo la pendiente del diagrama esfuerzo- deformación en la región elástica. Para deformar elásticamente un material con alto módulo elástico se requiere un esfuerzo alto, mientras que un esfuerzo menor será suficiente para deformar elásticamente un material con módulo elástico bajo. Es la pendiente del diagrama esfuerzo- deformación en la región elástica.

Módulo de Poisson es otra medida de las características de deformación de dimensiones unitarias sujeto a tensión. Debido a que las dimensiones del elemento son unitarias, los alargamientos y acortamientos son iguales a las deformaciones unitarias. Es una medida de la rigidez del material en dirección normal a la aplicación del esfuerzo.

$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} \quad (16)$$

Carga de Rotura: Es la mínima fuerza por unidad de área que es capaz de romper la fibra óptica.

Alargamiento en el punto de rotura: Es el alargamiento máximo de la fibra óptica antes de romperse bajo la tracción aplicada durante 1 seg.

Coefficiente de dilatación: Indica el alargamiento que sufre la fibra óptica por cada grado de temperatura. Para la fibra óptica de sílice su valor es de $0.5 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, es decir que 1000 m de fibra óptica sufrirán un alargamiento de 25 mm al pasar de 20 $^\circ\text{C}$ a 70 $^\circ\text{C}$.

2.1.8. PROBABILIDAD DE ROTURA DE UNA FIBRA ÓPTICA. MODELO DE WEIBULL

La rotura de fibras frágiles, y de materiales frágiles en general, ha sido tradicionalmente estudiada por métodos estadísticos basados en la teoría del eslabón más débil, formulado por vez primera en 1926 por Peirce [Peirce 1926]. Este modelo considera que la resistencia de cualquier elemento viene determinada por la de su sección más débil, de la misma forma que la resistencia de una cadena está determinada por la resistencia del eslabón menos resistente [14].

Entre los modelos basados en esta teoría [Gumbel 1958, Evans and Langdon 1976, Matthews 1976, Evans and Jones 1978] el más comúnmente empleado por su sencillez matemática y la relativa bondad de sus resultados es el modelo de Weibull, que en 1939 propuso la distribución estadística potencial para la resistencia de los materiales que lleva su nombre [Weibull 1939].

A continuación, y como resumen del modelo, se deduce la probabilidad de rotura de una fibra partiendo del modelo del eslabón más débil y empleando la distribución estadística de Weibull.

Se parte de la discretización de una fibra de longitud L en N segmentos de longitud L_i , tal que

$$L = \sum_{i=1}^N L_i \quad (17)$$

de manera que la fibra queda modelada como una cadena de N eslabones. El fundamento físico de este modelo consiste, en considerar que la cadena se romperá siempre por el eslabón más débil, y que la rotura de un eslabón supone la rotura de la cadena. Ver figura 7.

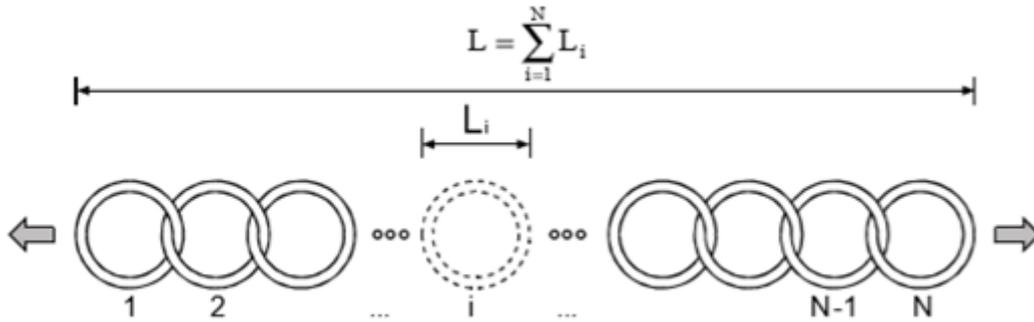


Figura 7: Cadena formada por N eslabones [14].

Se postula la existencia de una función $N(\sigma)$ que representa la probabilidad de que un segmento de fibra, de longitud unitaria, se rompa al ser sometido a una tensión σ , es decir, la probabilidad de que la resistencia del segmento sea menor que σ . Por lo tanto, la probabilidad F_i (probabilidad de fallo) de que se rompa un segmento i será

$$F_i = N(\sigma) * L_i \quad (18)$$

y su correspondiente probabilidad de supervivencia será

$$S_i = 1 - F_i = 1 - N(\sigma) * L_i \quad (19)$$

La probabilidad de que no se rompa la fibra, S , será el producto de todas las S_i :

$$S = \prod_{i=1}^n 1 - N(\sigma) * L_i \quad (20)$$

En la discretización de la fibra podemos hacer los segmentos tan pequeños como se desee, y como $1 - \varepsilon \cong \exp(-\varepsilon)$ podemos expresar la probabilidad de que no se rompa la fibra como:

$$S \cong \prod_{i=1}^n \exp(-N(\sigma) * L_i) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n N(\sigma) * L_i\right) = \exp(-N(\sigma) * L) \quad (21)$$

Se consideró que $N(\sigma)$ es la misma en todos los segmentos en que se divide una fibra homogénea, es decir, que los defectos están uniformemente distribuidos a lo largo de la fibra [15].

La función $N(\sigma)$ propuesta por Weibull es la siguiente:

$$N(\sigma) = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (22)$$

Donde:

m es el parámetro de forma, denominado módulo de Weibull.

σ_0 es el parámetro de escala, denominado resistencia característica.

L_0 es la longitud característica, que puede ser entendida como la longitud de las muestras empleadas en los ensayos realizados para determinar σ_0 . L_0 es una longitud de referencia que tiene en cuenta el efecto de tamaño y está unívocamente determinada por los valores de σ_0 y m .

Teniendo en cuenta la probabilidad de rotura de la fibra se obtiene:

$$F(\sigma, L) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \frac{L}{L_0}\right) \quad (23)$$

El modelo de Weibull da una medida de la dispersión del tamaño y posición de los defectos presentes en el material. Si $m = 0$ la distribución de defectos críticos es uniforme, y para cualquier valor de la tensión aplicada σ existirá un defecto crítico capaz de producir la rotura. En consecuencia, la fibra puede romperse con cualquier tensión. Si $m \rightarrow \infty$ sólo existen defectos críticos cuando se supera un valor determinado de la tensión σ_0 , y por lo tanto la tensión de rotura es la misma en todas las fibras e igual a σ_0 . Otros valores intermedios del módulo de Weibull, m , indican distribuciones de defectos críticos con mayor o menor dispersión según m se aproxime a cero o a infinito [16].

El modelo de Weibull es muy útil a la hora de comparar distintos materiales o diferentes técnicas de fabricación o procesado, puesto que muestra con claridad la calidad relativa del producto obtenido. Sin embargo, en términos absolutos proporciona poca información, ya que no es un modelo predictivo ni tiene en cuenta el mecanismo de rotura.

2.1.9 PRUEBAS A LAS FIBRAS ÓPTICAS

Sobre los cables con FO se realizan las siguientes pruebas: resistencia a la tracción de las FO y del cable; ciclo de temperatura; pruebas de aplastamiento e impacto sobre el cable; pruebas de penetración de agua o humedad; pruebas mecánicas de torsión, curvatura y flexión; pruebas eléctricas de rigidez dieléctrica de aislamiento y pruebas de adaptación ambiental y contaminación. Las características se miden de acuerdo con normas del IEC-793-1: dispersión cromática, longitud de onda de corte, diámetro del campo modal, dimensiones geométricas, campo lejano y características mecánicas.

2.2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE FIBRA ÓPTICA

Los sistemas de fibra óptica poseen tres componentes básicos los cuales son:

- Un emisor óptico
- Un receptor óptico
- El medio óptico (fibra óptica)

2.2.1 EMISORES ÓPTICOS

Son aquellos componentes que les llega una señal modulada eléctrica y al pasar por este se convierte en una señal modulada óptica, la cual es enviada de distintas formas ya sea mediante el encendido y apagado de la fuente que genera la luz o cambiando la intensidad que posee la luz.

Tipos de emisores ópticos:

- **LED** (*Light Emitting Diode*). Son usados esencialmente en cables de menor tamaño, además son bastante económico con respecto al laser.
- **LASER** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Se utilizan esencialmente en cables de grandes distancias y estos son más caros que los LED.

Características básicas:

Longitud de onda central: La atenuación de la radiación óptica en una fibra óptica es mucho más notoria en la banda de luz visible que en la banda infrarroja en la cual existen longitudes de onda con una atenuación mínima. Debido a esto se han establecido rangos de diferentes longitudes de onda donde existe atenuación mínima las cuales se las ha llamado “ventanas”. Las tres ventanas principales se encuentran en 850 nm (nanómetros), en los 1300 nm y en los 1550 nm. Dependiendo de las ventanas en donde se va a trabajar se escogen los diferentes emisores ópticos [10].

Ancho espectral: Depende del tipo de emisor, cuya potencia se encuentra a lo largo de un rango de longitudes de onda centradas en la onda central, a dicho rango se le da el nombre de ancho espectral.

Potencia media: Se encuentra relacionada durante la modulación de una manera directa con la intensidad de la luz, la cual se mide en Mili-vatios o dBm. Al poseer una mayor potencia media la longitud de enlace de la fibra puede ser mucho mayor.

Frecuencia de modulación: Se refiere a la frecuencia de modulación del emisor para poder transmitir la información por medio de una portadora óptica.

2.2.2 LED

Es una unión semiconductor $p-n$ que emite luz cuando se polariza directamente. Cuando se une un semiconductor tipo n con un semiconductor tipo p , se tiene que tanto los electrones libres en la región n , como los huecos libres en la región p no tienen la suficiente energía para sobrepasar la barrera de unión y desplazarse hacia la región opuesta. En este punto, la energía potencial de los huecos, siendo opuesta a la de los electrones provoca un incremento en la barrera de unión [17].

Al aplicar un voltaje directo en la unión, la barrera se reduce. Si la energía suplida es al menos igual que la energía en la región prohibida los electrones libres y los huecos libres tendrán la suficiente energía para moverse en la región de unión $p-n$. Cuando un electrón libre se une con un hueco libre en la barrera de unión, la energía perdida liberada en la recombinación es convertida en energía óptica en forma de fotón.

Para la fabricación de LEDs de alta eficiencia es necesario que la recombinación de electrón- hueco se realice en un área pequeña y que los fotones emitidos se radien en una dirección preferida. Esto se logra confinando a los portadores de carga en un área pequeña con barrera de potencial y confinando a los fotones con perfiles adecuados de índices de refracción.

La potencia óptica generada por un LED es linealmente proporcional a la corriente que circula por el dispositivo cuando es directamente polarizado. Típicamente un LED opera alrededor de los 50 a 100 mA y requiere un voltaje de 1.2 a 1.8V [10,17]

Los LEDs comerciales presentan un ancho de banda de modulación relativamente pequeño. Valores típicos se encuentran dentro del rango de 1 a 100 MHz. El tiempo de levantamiento típico de un LED va de unos pocos nano segundos hasta 250 ns. La eficiencia de acoplamiento depende del patrón de radiación del diodo. Los LEDs son muy confiables y de larga duración si se les utiliza dentro de los límites de potencia, corriente y temperatura especificados por el fabricante.

2.2.3 LÁSER

El principio de operación de los diodos láser es igual que para cualquier otro sistema laser, se requiere de una inversión de población y que la emisión estimulada de fotones sea mayor que la absorción. La inversión de población se obtiene generalmente con una corriente de inyección, aunque también puede lograrse con bombeo óptico.

Un diodo láser produce luz casi coherente lo que significa que su radiación es casi monocromática y casi no hay saltos de fase de esta radiación. La idea básica de un diodo láser consiste en usar una cámara resonante con espejos que refuerza la emisión de ondas luminosas de la misma frecuencia y fase. A causa de esta resonancia, un diodo láser produce un haz de luz muy estrecho, intenso y de espectro angosto. También se conoce como láser semiconductor o láseres de inyección, pueden producir luz visible (roja, verde o azul) y luz invisible (infrarroja) [17].

El diodo láser es capaz de proporcionar potencia óptica entre 0.005-25 mW, suficiente para transmitir señales cientos kilómetros de distancia por medio de una fibra óptica y cubren un intervalo de longitud de onda entre 920 y 1650 nm. La aplicación básica que se le ha dado al diodo láser es como fuente de

alimentación lumínica para sistemas de telecomunicaciones vía fibra óptica con grandes separaciones entre repetidores y altas velocidades de transmisión (comunicaciones de banda ancha) ya que con estos se logran distancias de 100 Km sin repetidores con velocidades de hasta 40 – 100 Gbit/seg. Sin embargo, para utilizar un diodo láser como fuente lumínica, es necesario contar con un sistema de control que mantenga el punto de operación del sistema fijo, debido a que un corrimiento de este punto puede sacar al diodo fuera de operación o incluso dañarlo.

2.2.4. COMPARACIÓN ENTRE DIODOS LÁSER Y DIODOS LEDS

Los diodos láser son más rápidos, tienen potencia de salida mayor, emisión coherente de luz y los LED emisión incoherente, proceso de construcción más complejo, modulación a altas velocidades, alrededor de decenas de GHz mientras que los LED tienen velocidades de modulación hasta 200MHz. Los diodos láser realizan emisión de luz dirigida en una sola dirección mientras que un diodo LED emite fotones en muchas direcciones.

Los diodos láser producen luz inclusive debajo de la corriente de umbral, la cual es originada por emisión espontánea. Debajo de la corriente de umbral, un diodo láser se comporta como un LED.

La diferencia principal entre ambos dispositivos es la eficiencia externa, que es mucho mayor en los diodos láser que en los LEDs. La distribución espectral de los LEDs es mucho mayor que la de un diodo láser.

La emisión de luz láser es monocromática: Los fotones emitidos por un láser poseen longitudes de onda muy cercanas entre sí. En cambio, la luz emitida por diodos LED tiene el espectro mucho más ancho.

2.2.5 RECEPTORES ÓPTICOS

Estos componentes reciben una señal modulada óptica y la transforman a una señal modulada eléctrica, y para que se dé un buen funcionamiento en el sistema de transmisión de fibra óptica tanto el emisor como el receptor deben trabajar en la misma longitud de onda [17].

Características básicas:

Sensibilidad umbral: Es la potencia mínima que pueda ser recuperada en el receptor a una cierta relación señal-ruido (SNR).

Tasa de errores ($BER=Bit Error Rate$): Presenta la tasa de bits que se han detectado como erróneos durante la conversión de la señal óptica a señal eléctrica, se verifica al observar la señal de recepción

y la sensibilidad que posee el receptor en donde si la señal recibida es mayor, la tasa de errores será pequeña.

Rango dinámico: La diferencia entre las potencias máximas y mínimas en las que el receptor puede trabajar de una manera adecuada, se basa en los niveles de potencia recibidos y si con estos el receptor funciona correctamente. Si la potencia de la señal es demasiado baja o muy alta se tendrá una tasa de errores elevada.

2.3. APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS EN TELECOMUNICACIONES E INSTRUMENTACIÓN

Las aplicaciones de las fibras ópticas no se restringen exclusivamente al campo de las telecomunicaciones. El rango de aplicaciones va desde comunicaciones civiles y militares hasta la instrumentación, diversas aplicaciones biomédicas, etcétera. Un ejemplo del uso de las fibras ópticas en sistemas militares es en aviones de combate. Estos aviones, debido a su complejidad tecnológica y a la gran cantidad de información que tienen que procesar, proveniente de todos sus sensores y a la redundancia que la información debe tener, usan sistemas de fibras ópticas para transmitir la información. Sin embargo, estos sistemas tienen una doble utilidad, pueden funcionar además como sistemas híbridos que incorporen capacidades sensoriales. Estos sensores pueden llegar a medir el estrés al que una superficie, como la de un avión, llega a ser sometida con resultados muy similares a los instrumentos usados comúnmente (calibradores de tensión, extensómetros) [18-20].

En general, los sensores basados en fibras ópticas pueden detectar cambios en temperatura, acústica, campos eléctricos y magnéticos, aceleraciones rotacionales y lineales. Las fibras ópticas, además, son altamente resistentes a condiciones extremas. Otra aplicación en aviones de combate, es como medidores de temperatura. En un estudio reciente se desarrolló un sensor capaz de medir temperaturas hasta los 600°C, además de ser inmune al deterioro de su superficie [21].

Pueden ser usadas también para detectar los agentes corrosivos en el ambiente que pueden comprometer la estructura de un avión, y así realizar un mantenimiento preventivo efectivo. Son además usadas en sistemas de radar y sismología. A diferencia de los radares convencionales o sensores ubicados en el lecho marino, que requieren de sistemas electrónicos complejos y un diseño eficiente, debido a la corrosión existente en el mar, el peso de éstos, sus constantes fallas, filtración de agua entre otros, se puede diseñar un arreglo de fibras ópticas que desempeñe las mismas funciones, pero con la ventaja de no contar con los problemas arriba mencionados y una alta sensibilidad acústica [22-24].

Las aplicaciones de las fibras ópticas no se restringen al complejo campo militar, son usadas también en diversos campos de la medicina. Se han desarrollado sensores incrustados en la ropa para así poder monitorear movimientos respiratorios mientras se realiza una resonancia magnética, con una resolución de elongaciones de entre 0% y 3%. Las posibilidades de estas aplicaciones médicas se extienden hasta el poder medir la actividad cardíaca, la temperatura corporal, el pulso oximétrico, sensores de pH, de presión entre otros [25-27].

En el campo de la mecánica, las fibras ópticas también tienen un lugar reservado. En estas aplicaciones, el costo del diseño tiene una consideración mayor que la que se puede encontrar en los casos militares o médicos mencionados anteriormente. Es de interés conocer la dureza de un material, su flexibilidad, desplazamiento, proximidad y vibración, flujo de fluidos y gases, velocidad, aceleración, momento angular, etc.

Los sensores de fibra óptica se han desarrollado principalmente en dos grandes grupos:

- Sensores de intensidad que evalúan el cambio en la intensidad de la luz generalmente con respecto a desplazamientos u otros fenómenos físicos que afectan a la fibra óptica.
- El sensor de interferometría o de fase modulada evalúa el cambio de fase del haz de luz, comparando un brazo de medición del sistema y el brazo de referencia. Debido a que la luz es confinada en la fibra, el dispositivo generalmente tiene una pérdida óptica muy baja, y dado la interferencia de la luz, es muy sensible a muchos parámetros.

Los sensores interferométricos de fibra óptica son usados cuando se requiere una alta sensibilidad en la detección, la mayoría de estos sensores usan fibra monomodo. El marcado incremento de la sensibilidad en el sensor cuando se usa fibra óptica monomodo surge debido a que éstas facultan la construcción de interferómetros con la propia fibra, permitiendo la medición de pequeños cambios de fase en la luz transmitida a través de la fibra, la cual es sometida a un parámetro físico a medir. Esto se logra al comparar la fase de una onda de luz que ha atravesado la trayectoria de detección con la fase de una onda de luz, proveniente de la misma fuente que no ha estado sujeta a la acción del estímulo. La ausencia de espacio libre entre el camino óptico de la fuente y los detectores elimina la posibilidad de que se presenten problemas de alineación, lo cual sí puede ocurrir si se usa un interferómetro óptico convencional [9].

Cuando se usan fibras que no mantienen el estado de polarización de la luz, pueden ocurrir cambios severos en la polarización, dando lugar a un desvanecimiento completo de la señal del interferómetro si las ondas de luz llegan a combinarse con polarizaciones ortogonales. Si se usa una fibra monomodo

estándar, se debe agregar al arreglo del interferómetro, controladores de polarización para reducir problemas de polarización [28].

La implementación de los diversos arreglos interferométricos con fibra óptica se han derivado de los diseños de interferómetros clásicos. Estas configuraciones incluyen los interferómetros tipo Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zender y Sagnac.

Los interferómetros basan su funcionamiento en la ecuación de interferencia entre dos o más ondas al propagarse en la misma dirección y sentido, definida como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (24)$$

Los dos primeros términos corresponden a las intensidades de cada uno de los haces, mientras el tercer término representa la interferencia. La intensidad total de la suma de las dos ondas, no es la suma de sus intensidades, depende de la diferencia de fase del tercer término, si éste es positivo o negativo, corresponde a una interferencia constructiva o destructiva, respectivamente.

Cumple las siguientes condiciones:

- Las ondas deben ser coherentes; es decir, deben mantener una fase constante.
- Las ondas deben ser monocromáticas, es decir, ellas deberían ser de una longitud de onda
- Las polarizaciones de ambas ondas deben ser iguales.

Los sensores de fase son más precisos que los sensores de intensidad, pero a un mayor precio y, por lo tanto, se utilizan principalmente para aplicaciones complejas que requieren precisión y rango dinámico amplio [29-33].

2.3.1. INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

Interferómetro de Michelson en fibra óptica es uno de los interferómetros más versátiles desarrollados hasta ahora y uno de los diseños más antiguos, pero no por ello se ha dejado de emplear; por el contrario, se han realizado muchas variaciones que en la actualidad son de las más empleadas para diferentes propósitos. Entre estas modificaciones se puede mencionar el interferómetro de fase escalada de Michelson que es capaz de realizar mediciones de alta precisión de superficies y formas, de componentes altamente reflectantes. Así también pueden utilizarse sustituyendo los espejos por rejillas de Bragg [10].

Se muestra la configuración óptica básica en la Figura 8 a) en espacio libre y b) con componentes de fibra óptica.

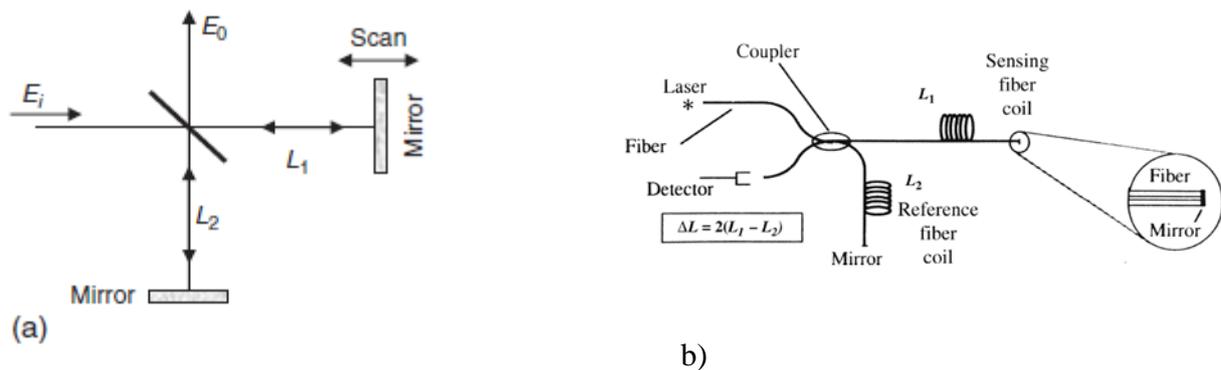


Figura 8: Configuración del Interferómetro de Michelson en el espacio libre (a) y en fibra óptica (b) [10].

En el caso del interferómetro de Michelson, utiliza un acoplador para dividir la intensidad de la luz de entrada, proveniente de una fuente coherente, en dos caminos ópticos diferentes, también llamados brazos del interferómetro, uno de referencia y otro de detección. La luz se divide en dos haces, uno por cada brazo, los cuales son reflejados nuevamente y recombinados por el divisor de haz para así formar un patrón de interferencia. Cuando el camino que uno de los haces recorre varía con respecto del otro, existe una diferencia de fase cuando estos haces son recombinados. Dicha diferencia de fase resulta en una interferencia constructiva y destructiva, produciendo bandas iluminadas y oscuras, conocidas como franjas de interferencia.

Debido al doble camino que recorre la luz (de ida y de vuelta), en el interferómetro Michelson, se considera el desplazamiento de ida o de vuelta con la siguiente ecuación:

$$I(\Delta L) = \frac{I_0}{2} * [1 + \cos(kn\Delta L)] \quad (25)$$

2.3.2. INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER

Los interferómetros Mach-Zehnder (IM-Z) en fibra óptica son dispositivos pasivos muy atractivos debido a que son simples de fabricar y presentan excelentes características para detectar cambios de índice de refracción, variaciones en temperatura y esfuerzo. Estos dispositivos pueden utilizarse en moduladores, filtros multicanal y dispositivos de multiplexado por división de longitud de onda (WDM). Se han propuestos diferentes configuraciones para la fabricación de estos interferómetros en la modalidad de un solo brazo, de las cuales se pueden destacar; dos rejillas de período largo en serie, combinación de una rejilla y un empalme con desalineación de ejes, un estrechamiento y una rejilla de período largo y dos estrechamientos en serie entre otras [10].

El interferómetro de Mach-Zehnder convencional es de dos brazos. Normalmente hay un brazo de referencia el cual se aísla de los efectos medioambientales, y un brazo de detección el cual se expone a las señales a medir.

A diferencia del Michelson en esta configuración se obtienen dos señales de salida de la misma magnitud pero que están en contrafase, esto quiere decir que tienen una diferencia de fase de π radianes.

La intensidad de salida para el primer detector es:

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos\phi) \quad (26)$$

La intensidad de salida para el segundo detector es:

$$I' = \frac{I_0}{2} (1 - \cos\phi) \quad (27)$$

2.3.3. INTERFERÓMETRO FABRY-PEROT

El interferómetro de Fabry-Perot (IFP) consta de dos espejos de reflectancia R separados por una cavidad de longitud L . A finales de 1980, los interferómetros de Fabry-Perot de fibra comenzaron a ser aplicados a la detección de temperatura, tensión y la presión ultrasónica en materiales compuestos. La configuración para un interferómetro Fabry-Perot en fibra (en la mayoría de los casos, monomodo) transporta la luz desde un emisor al interferómetro y desde el interferómetro a un fotodetector [10].

En este tipo de interferómetro, debido a la alta reflectividad de los espejos, la luz rebota en la cavidad, experimentando así retardo de fase en la cavidad de fibra muchas veces. La variación de la intensidad de salida de transmisión en función del cambio de fase de un interferómetro Fabry-Perot está dada por:

$$I_T(\phi) = \frac{I_0 T^2}{(1 - R^2)} \frac{1}{1 + [4R/(1 - R^2)] \sin^2\phi} \quad (28)$$

Donde T y R son los coeficientes de transmisión y reflexión de los espejos, I_0 es la intensidad de entrada. Cabe señalar que la intensidad reflejada se puede calcular por la ecuación:

$$I_R(\phi) = 1 - I_T(\phi) \quad (29)$$

El retardo de fase total ϕ para un único trayecto a través de la cavidad:

$$\phi = knL \quad (30)$$

donde n es el índice de refracción de la región entre los espejos y λ la longitud de onda. Se ha supuesto que la luz experimenta un cambio de fase de $\pi / 2$ en cada reflexión, según sea apropiado para espejos dieléctricos, que se añade al desplazamiento de fase de propagación.

2.4. ANTECEDENTES DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN EN LA UNAM

El monitoreo de los elementos estructurales de edificaciones tales como: puentes, túneles, torres y edificios es un tema de gran interés en los últimos años, debido a la creciente preocupación en la prevención de fallas catastróficas de los edificios y grandes proyectos de infraestructura. En el laboratorio de Fibras Ópticas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a cargo del Dr. Sergiy Khotyaintsev llevan varios años realizando investigaciones sobre este tema, los cuales se han reflejado en varios trabajos de tesis y diferentes publicaciones [34-36].

Un ejemplo muy reciente es la tesis de doctorado de Juan Emmanuel González Tinoco, Redes de fibras ópticas de monitoreo de salud de estructuras, terminada en el 2018 [2]. En esta investigación se realizó una propuesta conceptual de una red de fibra óptica de detección de daño estructural en elementos de concreto. Se diseñaron, implementaron y se evaluaron diversas formas de introducir las fibras ópticas multimodales dentro del molde y fabricar los elementos de concreto con fibras embebidas al interior de dichos elementos.

En total fueron fabricados y sometidas a las pruebas once especímenes de elementos estructurales de concreto: vigas de concreto reforzado con las barras de acero, de dimensiones estándar de 150x150x600 mm. Fueron embebidas las fibras multimodo de 100, 200, 400 y 600 μm en diferentes ubicaciones. Fue implementado con éxito el monitoreo de la transmisión óptica de todas las fibras ópticas embebidas en los elementos estructurales realizados, desde el llenado de moldes con mezcla hasta el asentamiento de la mezcla, dando como resultado los datos sobre la tasa de sobrevivencia de las fibras ópticas en función de su tipo, marca y modelo [3].

Se encontró que la tasa de sobrevivencia de las fibras ópticas utilizadas en el experimento se encuentra entre el 25 % y 100 %, dependiendo del tipo de la fibra óptica y la metodología particular utilizada para la fabricación de los elementos de concreto.



Figura 9: Elementos Estructurales con fibras ópticas embebidas [3].



Figura 10: Secuencia del desmontaje del molde y placas laterales [3].

Posteriormente realizó un estudio experimental de las fibras ópticas en el monitoreo de una pila de mampostería de tabique. La estructura a monitorear ya elaborada se observa en la figura 11. Se colocaron las fibras ópticas entre los tabiques de concreto, dos fibras ópticas en cada nivel. Se utilizaron fibras ópticas multimodo de 100, 200 y 400 μm de diámetro de núcleo; con una longitud física de seis metros cada fibra óptica. Las fibras ópticas se pegaron con un pegamento epóxico de categoría industrial que se adhiere a diferentes tipos de materiales entre ellos el concreto.



Figura 11: Pila de mampostería de tabique instrumentada con fibras ópticas [3].

Se demostró que los arreglos de las fibras ópticas pegadas a la superficie de los tabiques son capaces de romperse y disminuir su transmisión óptica drásticamente al presentarse las grietas en el espécimen bajo la carga de compresión.

Otro trabajo de investigación de este grupo es el realizado por Luis Ángel Hernández Viveros, el cual fue enfocado fundamentalmente en sistema de procesamiento de señales para una red de sensores, pero también hizo experimentos sobre la modulación de la intensidad de la luz en una fibra óptica por las microcurvaturas de la misma en una estructura metálica en forma de diente de sierra [5]. Con el objetivo de resolver la incógnita de qué es lo que pasa con la fibra óptica embebida dentro de las columnas de cemento, dado que se ha observado que dentro de la columna la fibra no sigue una trayectoria recta, sino que la grava empleada en la construcción de las columnas e incluso el mismo cemento provocan que la fibra siga trayectorias irregulares en las que sufre de microcurvaturas.

La estructura en forma de diente de sierra, utilizada en los experimentos se muestra en la figura 12, consiste en dos placas de aluminio, sobre las que se pegaron bloques de ángulos de aluminio, los cuales asemejan un prisma triangular de base isósceles. Las fibras empleadas fueron de 50, 150 y 240 μm de diámetro, en cada uno de los experimentos la fibra fue colocada entre las dos placas de aluminio, justo al centro de estas para poder comprimirla con las placas de aluminio al ejercer una fuerza sobre la estructura.

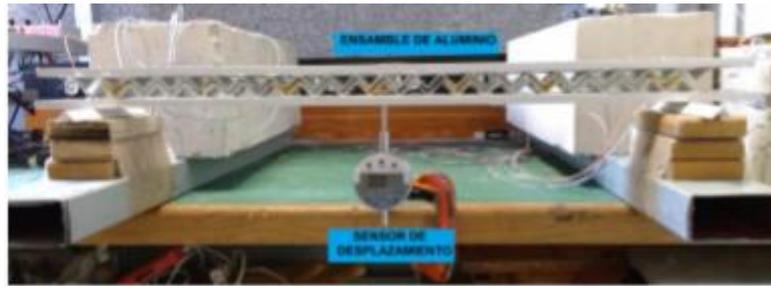


Figura 12: Estructura en forma de diente de sierra [5].

En la realización de estos experimentos, se observó que el tipo de curvaturas que se generó, no afectaba de manera significativa a la fibra de 240 μm de diámetro de núcleo, ya que no se observó una variación grande en la amplitud de la señal recibida. Mientras que en las fibras de 50 μm de diámetro de núcleo, la microcurvatura generada causó una variación en la amplitud normalizada de la señal recibida, lo cual si afectó en el análisis de resultados. Se concluyó que las microcurvaturas afectan solo en fibras de menor diámetro, ya que son más delgadas y más sensibles que las de núcleo mayor [5].

También se realizó otro experimento, que consistía en la ruptura de la fibra óptica que atravesaba a una grieta en el tabique. Se realizó un modelado físico de la ruptura de un tabique con una instalación diseñada y fabricada especialmente para tal propósito (Ver figura 13). El objetivo fundamental era tener un modelo, lo más cercano a lo que ocurre en la realidad simulando un agrietamiento de la estructura.

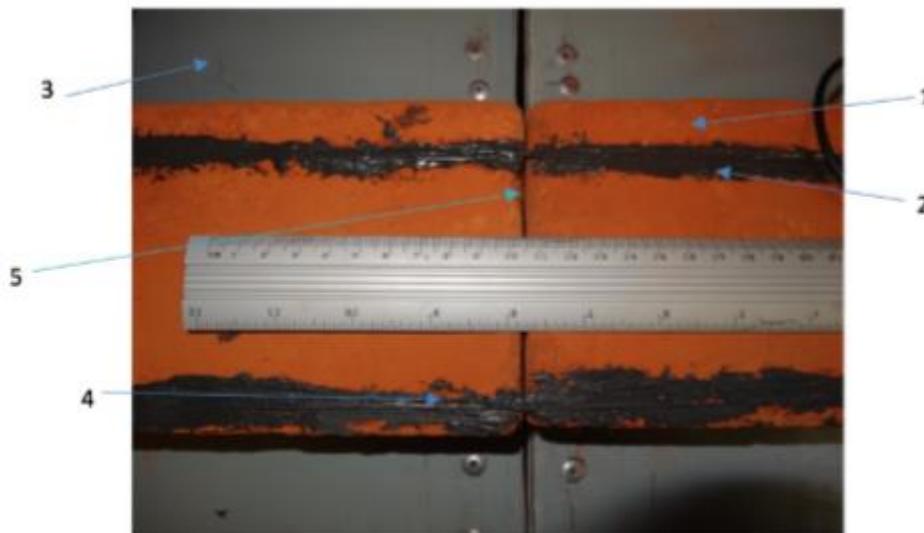


Figura 13: Experimento de ruptura de la fibra [5].

1. Ladrillo 2. Fibra óptica 3. Estructura metálica 4. Pegamento epoxy 5. Separación entre ladrillos.

Para este experimento se utilizaron 3 tipos de fibras de 50, 240 μm de recubrimiento de acrílico y una fibra plástica de 240 μm . Para la fibra plástica a los 1.1 mm de desplazamiento de los ladrillos se observó una disminución de amplitud en el voltaje y la de 50 μm se rompió a los 4.9 mm mientras la de 240 μm solo disminuyó su amplitud no llegó a romperse.

A raíz de estas investigaciones surgió la necesidad de determinar el desplazamiento que se podía medir con diferentes fibras ópticas para seleccionar cuál sería la más adecuada en la detección de fallas estructurales. Se propuso mejorar la instalación experimental, utilizar mayor cantidad de fibras ópticas con diferentes recubrimientos, tamaño de núcleo y hacer un mayor número de experimentos con cada fibra para llegar a resultados más determinantes.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LA RESPECTIVA INSTALACIÓN

3.1. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

La técnica utilizada para detectar grietas en la mampostería de ladrillos es emplear las fibras ópticas en forma de matrices de diferentes extensiones y topologías, unidas a la superficie de los elementos estructurales por medio de pegamento, ver figura 14.

A medida que la grieta ocurre, pasa a través de la fibra óptica, la cual se estira y luego se fractura. La fractura de la fibra óptica resulta en una disminución brusca en su transmisión óptica, lo que es testigo del inicio de las grietas.

Se supone que una red suficientemente densa de fibras ópticas desplegadas de manera inteligente en los elementos estructurales críticos de un edificio puede proporcionar información útil sobre el grado de daño estructural del edificio.



Figura 14: Fibra adosada a mampostería de tabique [2].

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El objetivo fundamental del experimento es determinar el tipo de fibra más adecuado para la detección de fallas, el desplazamiento máximo que se puede detectar sin que se rompa la fibra, así como el tipo de pegamento a utilizar dependiendo del recubrimiento de la fibra óptica utilizada.

Para la realización de los experimentos se utilizó una metodología de trabajo la cual consiste en el empleo de una instalación mecánica mostrada en la figura 15 y 16. Se colocan la fibra óptica (1) con un determinado pegamento (2) sobre cuatro ladrillos (3) que descansan sobre una plancha de aluminio (4) sujeta a cuatro cilindros (5) que la separan de la base (6). Dos de los ladrillos (3 a, b) se encuentran fijos y los otros dos (3 c, d) se mueven por medio de un brazo mecánico (7), conectado a un dinamómetro (8) que medirá la fuerza aplicada por este brazo para separar los ladrillos. La separación máxima antes que se rompa la fibra óptica se obtendrá de un sensor de desplazamiento (9) conectado al final del ladrillo (3d). Además, se monitorea la transmisión de la fibra óptica que se encuentra sometida a la prueba mecánica que se mencionó anteriormente a través de un fotodetector conectado a un multímetro y un osciloscopio.

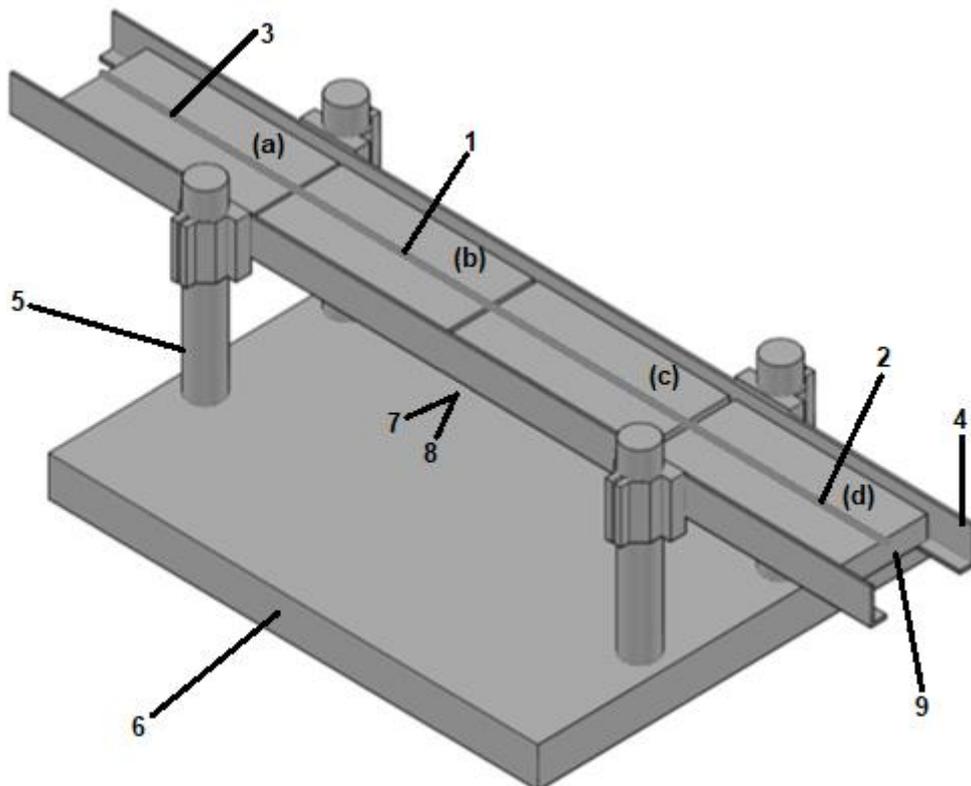


Figura 15: Esquema de instalación mecánica.

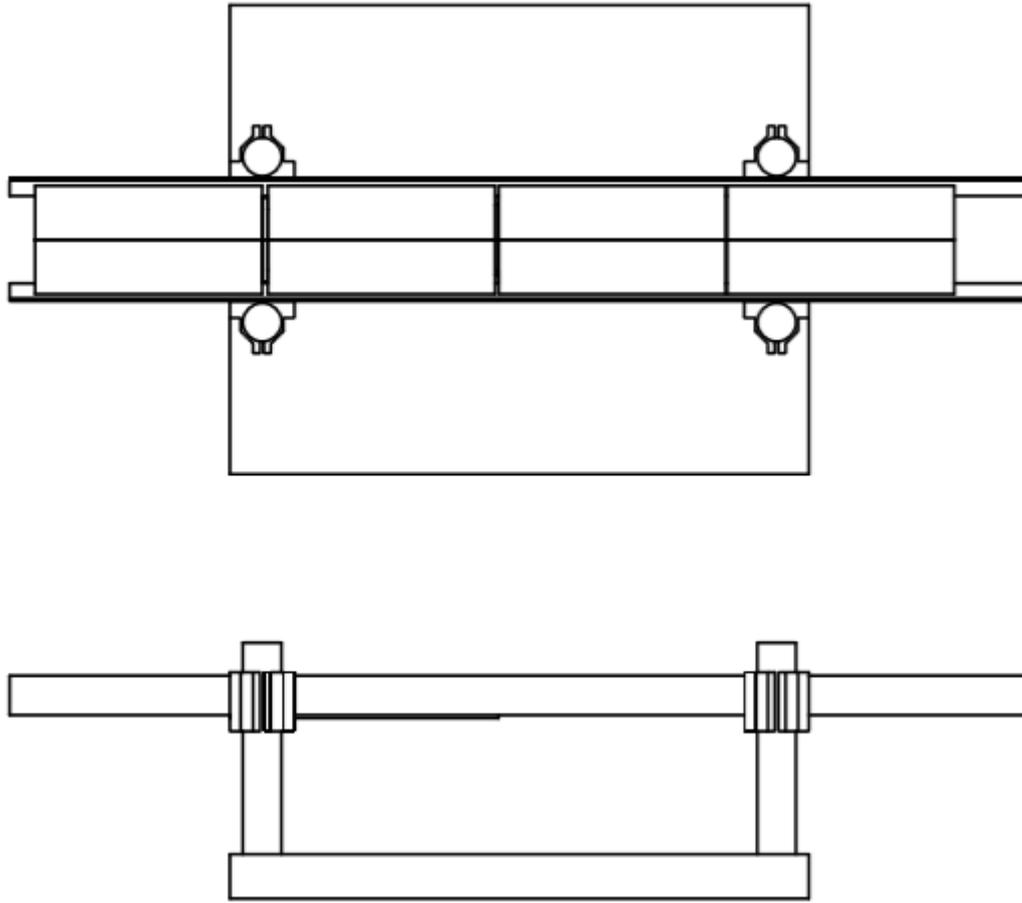


Figura 16: Vista superior y frontal de la instalación mecánica.

3.2.1. SUBSISTEMA MECÁNICO

El objetivo fundamental de esta instalación es permitir variar la separación de los tabiques, para determinar el desplazamiento que puede llegar a alcanzar sin que se rompa la fibra óptica. Para ello se utiliza una mesa de trabajo Thorlabs (base) que soporta toda la estructura mecánica. La plancha de aluminio que soporta los tabiques está sujeta a 4 cilindros como se observa en la figura 15. La unidad de traslado consiste en dos partes, una fija que sería del centro a la izquierda y la otra móvil, conformada por un brazo mecánico que la va separando por medio de una manivela. La unidad mecánica consta de un sensor (dinamómetro) que mide la fuerza ejercida para mover la pieza, permitiendo saber la fuerza que está soportando la fibra. Para medir los desplazamientos de los tabiques se utiliza un sensor de desplazamiento Fowler, con un rango de medición de 0 - 12.5 mm y resolución de 0.01 mm.

Dimensiones de la instalación:

	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Ladrillos	229	110	25
Plancha de aluminio	1028	125	40
Base	585	480	45

Cilindro: Diámetro: 39 mm

Altura del cilindro: 215 mm

Altura donde va la plancha: 185 mm

3.2.2 SUBSISTEMA ÓPTICO

Constitución de un enlace óptico

El sistema óptico de la instalación experimental constituye un enlace óptico, cuyo objetivo consiste en el monitoreo de la integridad de la fibra óptica en el proceso de su prueba mecánica hasta la ruptura total. Para lograr dicho objetivo, el enlace consta de un módulo transmisor óptico, la línea de transmisión que es la fibra óptica y el receptor óptico como se observa en la figura 17.



Figura 17: Diagrama en bloques del Subsistema Óptico.

Fuente de luz

El láser utilizado es de helio-neón, tiene espejos internos rígidos y pequeños tamaños físicos. Debido al bajo nivel de ruido, los láseres ofrecen una mayor fiabilidad, flexibilidad de diseño y un rendimiento mejorado. La base del láser está ranurada para el montaje en la mesa de laboratorio. Estos láseres Lumentum HeNe también cuentan con fuentes de alimentación autónomas para una integración simple del sistema. La longitud de onda de trabajo es 633 nm, diámetro del haz de 0.48 mm, tolerancia del

diámetro del haz de ± 3 , divergencia del haz 1.7 mrad, potencia máxima menor a 4 mW, ruido RMS de 30 hz-10 kHz de 1.0 % [38].

Fibra Óptica

En este trabajo el objetivo fundamental es emplear varios tipos de fibras para determinar la más óptima para la detección de fallas estructurales.

Se utilizaron fibras: FG105LCA (AFS105/125Y), FG050LGA (AFS50/125Y) y FG200LEA (AFS200/220Y) las cuales presentan 0.22 NA, un núcleo de sílice puro con revestimiento de sílice dopado con flúor, y están disponibles con concentraciones de iones hidroxilo (OH) altas o bajas para UV a visible (250 - 1200 nm) o visibles para NIR (400 - 2400 nm) respectivamente [39].

Las características fundamentales de estas fibras se observan en la figura 18 -20.

0.22 NA Hard Cladding, Silica Core, Multimode Fiber	
Wavelength Range	400 - 2400 nm (Low OH) 250 - 1200 nm (High OH) ^a
Core / Cladding	Pure Silica / Fluorine-Doped Silica
Coating	Acrylate
Operating Temperature	-40 to 85 °C
Numerical Aperture (NA)	0.22 ± 0.02
Bandwidth @ 820 nm	15 MHz•km

Figura 18: Especificaciones Técnicas Fibra Óptica [39].

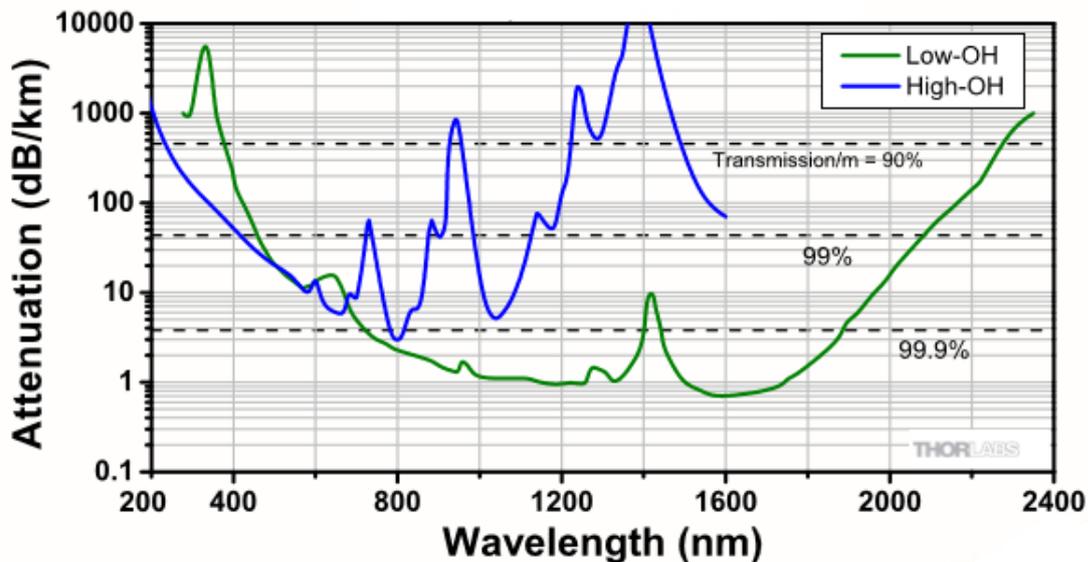


Figura 19: Atenuación para la Fibra Óptica 0.22 NA, Glass-CladSilica [39].

Item #	Core Diameter	Clad Diameter	Coating Diameter	Maximum Attenuation @ 808 nm	Bend Radius Short Term/ Long Term
FG050LGA	50 $\mu\text{m} \pm 2\%$	125 $\pm 1 \mu\text{m}$	250 $\mu\text{m} \pm 4\%$	8 dB/km	120 x Cladding Diameter / 240 x Cladding Diameter
FG105LCA	105 $\mu\text{m} \pm 2\%$	125 $\pm 1 \mu\text{m}$	250 $\mu\text{m} \pm 4\%$	8 dB/km	
FG200LEA	200 $\mu\text{m} \pm 2\%$	220 $\pm 2 \mu\text{m}$	320 $\mu\text{m} \pm 5\%$	8 dB/km	

Figura 20: Dimensiones de las fibras ópticas [39].

También se utilizó la Fibra Óptica Jumper Multimodo 62.5/125 que tiene un recubrimiento riser retardante a la flama, permite una fácil instalación, son menos susceptible a pérdidas por micro curvaturas, ofrecen una baja pérdida de inserción y son inmune a la interferencia eléctrica. Temperatura adecuada de operación -20 °C hasta los 85 °C [40]. Las características fundamentales de esta fibra se muestran en la figura 21.

Cubierta Exterior	Color	Multimodo: naranja		
	Diámetro	3mm $\pm 0.05\text{mm}$	2mm $\pm 0.05\text{mm}$	1.6mm $\pm 0.05\text{mm}$
	Espesor	0.80mm $\pm 0.8\text{mm}$	0.60mm $\pm 0.05\text{mm}$	0.60mm $\pm 0.05\text{mm}$
	Temperatura	-20°C hasta los 85°C.		
Fibra óptica	Diámetro del núcleo	Fibra	Valor	
		50/125 μm 62.5/125 μm	$\pm 0.7\text{mm}$	
	Diámetro de cladding	125.0 $\pm 2.0\mu\text{m}$		
	Concentricidad del núcleo	$\leq 1.5\mu\text{m}$		
	Concentricidad del cladding	$\leq 1.0\%$		
	Longitudes de onda	Multimodo:	850nm	1300nm
	Valor máximo	dB/Km	≤ 0.03	≤ 0.02
Fuente de luz recomendable	Multimodo: LED o VCSEL			

Figura 21: Características de Jumper Multimodo 62.5/125 [40].

Otra de las fibras utilizadas es la FP200ERT, presenta 0.50 NA, con revestimiento de polímero duro (Tefzel), multimodo de índice escalonado. Ofrece altas aperturas numéricas para adaptarse a una amplia gama de aplicaciones, desde la iluminación remota hasta la terapia fotodinámica [39].

En la figura 22 y 23 se muestran las principales características de esta fibra.

FP200ERT	
Transmission Region	400 - 2200 nm (Low OH Content)
Core Diameter	200 ± 5 μm
Cladding Diameter	225 ± 5 μm
Coating Diameter	500 ± 30 μm
Core / Cladding Material	Pure Silica / Hard Polymer
Operating Temperature (Tefzel Coating)	-40 to 150 °C
Numerical Aperture (NA)	0.50
Attenuation	12 dB/km @ 810 nm (Max)
Proof Test Level	≥100 kpsi
Max Core Offset	5 μm
Bend Radius	8 mm (Short Term) 16 mm (Long Term)
Recommended Stripping Tool	T12S21

Figura 22: Características de la fibra óptica FP200ERT [39].

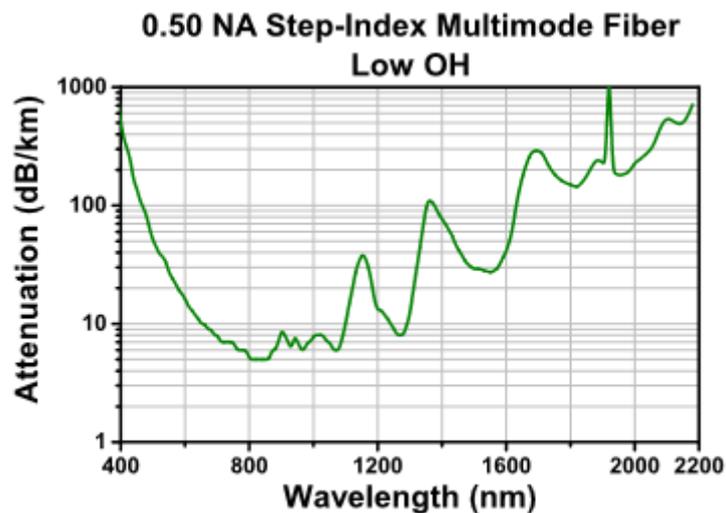


Figura 23: Atenuación para la Fibra Óptica 0.50 NA, FP200ERT [39].

Fotodetector

El fotodetector utilizado en el sistema es el PDA36A, el cual permite un rango de longitud de onda de 350 nm a 1000 nm, máximo ancho de banda de 10 Mhz. Incluye un amplificador de transimpedancia de alta ganancia y bajo nivel de ruido y baja compensación que permite el ajuste de ganancia en un rango de 70 dB, con 8 posiciones de ganancia incrementadas en pasos de 10 dB. Impedancia de entrada de 50 Ω, área activa de 3.6 X 3.6 mm (13mm²), detector tipo PIN y una temperatura de operación 0-40 °C [41].

La responsividad del fotodetector se muestra en la figura 24.

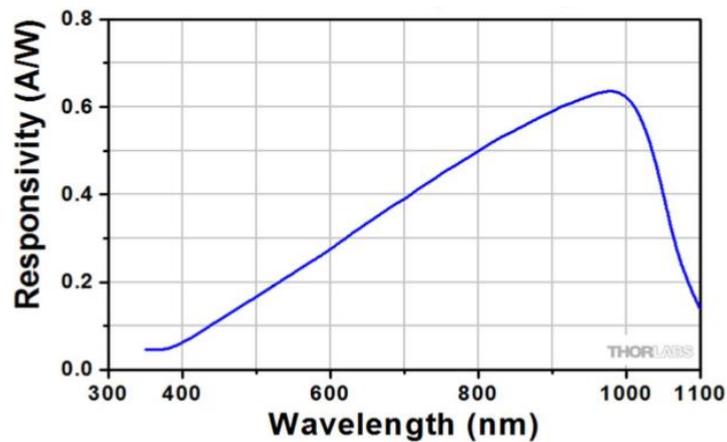


Figura 24: Responsividad del Fotodetector PDA36A [41].

3.3. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Primeramente, se procede a pegar la fibra a los tabiques, para ello se lija un poco la superficie, con el fin de lograr mayor absorción del pegamento y se procede a aplicar el pegamento. Se deja secar el pegamento alrededor de 24 horas.

Posteriormente se acopla la fibra al laser para lograr recibir mayor señal en el fotodetector, el cual se encuentra conectado a un multímetro y al osciloscopio, con los cuales se observa el nivel de la señal recibida y se podrá determinar, si ocurre un cambio abrupto en las mediciones, si la fibra se daña parcialmente antes de romperse.

Una vez listos todos los parámetros, se procede a mover la manivela, que provocará que se vayan separando los tabiques. A medida que se mueve la manivela aumenta la fuerza que ejerce el brazo mecánico para separar los tabiques, fuerza que está siendo soportada por la fibra óptica. Se continúa moviendo la manivela hasta romper la fibra óptica. El sensor de desplazamiento muestra cuánto se han desplazado los tabiques. Los datos tomados de los experimentos fueron: el desplazamiento (Δ), la fuerza (F) y el voltaje (V) que fueron arrojados por el sensor de desplazamiento, el sensor de fuerza y el multímetro respectivamente.

Se considera una serie de 7 a 10 experimentos por fibra, como un número suficiente de valores para determinar un desplazamiento (Δ) certero, con los cuales se realizaron una serie de cálculos estadísticos.

El objetivo es realizar una serie de experimentos con fibras de diferentes diámetros y material de recubrimiento y con diferentes tipos de pegamento, para tener un criterio más amplio de selección.

Una consideración importante es que en los primeros experimentos se apretó de más la manivela, factor que influyó en la fuerza inicial, provocando valores elevados de fuerza, aspecto que se corrigió en los

siguientes experimentos, ya que se observó que una vez juntos los ladrillos no era necesario continuar moviendo la manivela, pues no se unían solo se apretaba de más y no se obtenían datos reales, ya que la fuerza inicial para comenzar a desplazarse los ladrillos aumentaba en magnitud.

3.4. CONSIDERACIONES SOBRE EL PEGAMENTO PARA SUJETAR LAS FIBRAS ÓPTICAS

La única forma de sujetar la fibra óptica en la superficie de la mampostería de tabique con un buen contacto físico con la misma es por medio de un pegamento. En la bibliografía, no hay recomendaciones sobre el tipo o tipos de pegamentos adecuados para dicho propósito ni datos suficientes sobre los procesos físicos y/o químicos que contribuyen a la unión de los materiales que se consideran en este trabajo, con diferentes pegamentos.

El pegamento o adhesivo se define como una sustancia que puede mantener unidos dos o más cuerpos por contacto superficial. Aunque la adherencia puede obedecer a diversos mecanismos de naturaleza física y química, desde el punto de vista tecnológico los adhesivos son los componentes del grupo de productos, naturales o sintéticos, que permiten obtener una fijación de carácter mecánico [42].

Se pueden encontrar adhesivos sólidos que destacan los adhesivos termofusibles que se utilizan en procesos industriales que los calientan para fundirlos, aprovechando su propiedad de enfriarse rápidamente para acelerar los procesos productivos. También son adhesivos sólidos las barras de pegamento para papel o los adhesivos en polvo (a base de acetato o formaldehído). También los adhesivos líquidos que son comúnmente conocidos como colas blancas se utilizan en su composición un vehículo líquido (normalmente agua o disolvente) que, una vez usado, tiende a perder, hasta obtener un secado que hace que la unión sea resistente [43].

Clasificación en función a sus componentes:

- Adhesivos sintéticos: A base de polímeros derivados del petróleo (colas de poli-vinil-acetato, colas etilénicas, colas de poliuretano, colas de caucho sintético, adhesivos anaeróbicos o de cianoacrilato).
- Adhesivos de origen vegetal: A base de derivados de la fécula de patata, el maíz (colas de almidón, dextrinas, cauchos naturales).
- Adhesivos de origen animal: A base de pieles de animales o su esqueleto (colas de pezuña, de gelatina), colas de derivados lácteos (caseína). Clara de huevos.

Clasificación en función de su curado

- Adhesivos químicamente reactivos: Incluidos los poliuretanos, epoxis, fenólicos, poliimidas y anaeróbicos. Hay de uno y de dos componentes; los primeros se curan por reaccionar químicamente a la temperatura, a la humedad o al calor, mientras que los de dos componentes al entrar en contacto las dos resinas.
- Adhesivo por evaporación o difusión: Estos se preparan como solución al disolverse en solventes orgánicos o en agua y se aplican sobre el lugar que se quiere mantener pegado. Hay una preferencia notable hacia los adhesivos de base agua por el hecho de la seguridad ambiental que representa su consumo. Por ejemplo, vinilos y acrílicos.
- Adhesivos de fusión por calor: Conformados por termoplásticos y elastómeros que se funden sobre la superficie a pegar si son calentados. El grupo de alto rendimiento está formado por las poliamidas y los poliésteres.
- Adhesivos sensibles a la presión: Son principalmente elastómeros fabricados en forma de recubrimiento. Se les aplica presión para provocar la adherencia.

Básicamente, se pueden distinguir dos tipos de fenómenos en la interfase sustrato-adhesivo: los de tipo físico y los de tipo químico [44,45]. Las diferentes teorías pueden encuadrarse dentro de esta primera división:

1. Fenómenos físicos:
 - a) Modelo de adhesión mecánica.
 - b) Teoría de la difusión.
 - c) Teoría eléctrica.

2. Fenómenos químicos:
 - a) Teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial.

El modelo de adhesión mecánica es el primero y más antiguo de todos. Según este modelo, la adhesión se debe a un anclaje del polímero (adhesivo) en los poros y rugosidades superficiales del sustrato. La penetración del adhesivo en la orografía superficial del sustrato provoca que la zona de contacto real entre los dos materiales sea varias centenas de veces superior a la correspondiente a la superficie aparente de contacto. Por tanto, rugosidad y porosidad son factores favorables a la adhesión. Es preciso asegurar una buena humectabilidad del sustrato por el adhesivo, puesto que las cavidades no alcanzadas por el adhesivo constituyen puntos potenciales de iniciación de rotura de la unión adhesiva [46].

La teoría de la difusión se utiliza para explicar la adhesión de los polímeros entre sí. Plantea la adhesión como resultado de una interfusión de las moléculas de los planos superficiales, lo que conlleva la creación de una zona de transición entre el adhesivo y el adherente, la cual sustituye la noción de

interfase pura sin espesor por la noción de interfase espesa o densa o "*interface*". El mecanismo parece ser basado en la migración de las cadenas poliméricas largas que son mutuamente solubles. Este fenómeno se encuentra limitado a la autoadhesión, a la adhesión de polímeros compatibles y quizás también a la soldadura termoplástica o con disolvente.

La teoría eléctrica compara el sistema adhesivo/sustrato a un condensador plano cuyas placas están constituidas por la doble capa eléctrica que se forma cuando dos materiales de naturaleza diferente se ponen en contacto, por ejemplo, un polímero y el vidrio. La existencia de una doble capa eléctrica es fundamental para explicar los fenómenos de adhesión, pero no puede considerarse un modelo universal, y sólo se puede aplicar a determinados casos particulares. Además, la contribución a la adhesión debida a fuerzas de van der Waals es en algunos casos superior a la procedente de interacciones electrostáticas [47].

La teoría de la adsorción termodinámica o mojado superficial explica muchas de las uniones adhesivas que se realizan habitualmente. Algunos autores apoyan la idea de que al poner en contacto íntimo dos sólidos no importa que haya o no difusión porque cuando se produce, las fuerzas intermoleculares que se desarrollan en la interfase son suficientes para garantizar una adhesión del mismo orden de magnitud, no existiendo por tanto una frontera clara entre difusión y adsorción termodinámica. En esta teoría estas fuerzas se denominan "fuerzas de humectación o mojabilidad" porque cuando se forma una unión adhesiva se pasa por una fase de contacto entre el líquido y el sólido, y este proceso es al fin y al cabo de mojado [48-50].

En general, se distinguen diferentes tipos de fuerzas involucradas en el fenómeno de adsorción:

- Enlaces secundarios:
 - Fuerzas de van der Waals.
 - Puentes de hidrógeno.
- Enlaces primarios:
 - Enlace iónico.
 - Enlace covalente.

A pesar de su debilidad relativa, los enlaces secundarios generan en la práctica uniones suficientemente fuertes, dado que la superficie que entra en juego es considerable. Los enlaces primarios mejoran la durabilidad de las adhesiones y suelen ser necesarios para la adhesión de materiales cerámicos y vidrio.

En nuestro trabajo empleamos el pegamento epoxy transparente, el cual es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Las resinas epoxy más frecuentes son producto de una reacción entre epíclorohidrina y bisfenol A.

Las ventajas del pegamento epoxy son las siguientes:

- Adhieren casi todos los sustratos.
- Gran relleno de holguras.
- Alta resistencia a cizalla y a tracción.
- Adhesivos muy rígidos.
- Resistencia a pelado y a impacto en formulaciones flexibles (epoxi-nitrilo).
- Aunque es dieléctrico y aislante térmico, puede ser modificado ser conductor de la electricidad y del calor. Además, se pueden adicionar cargas para mejorar las características mecánicas.
- Buena resistencia química.
- Resistencia a temperaturas de hasta 180°C (hasta 250°C en algunas formulaciones).

Otro pegamento utilizado es el acrílico, los adhesivos acrílicos no necesitan que la mezcla entre resina y activador sea completamente homogénea, ya que una vez generados los "centros activos", la propagación del polímero se produce en el seno del adhesivo. No se recomienda el uso de calor para acelerar el curado [49].

Los acrílicos se presentan comercialmente según dos sistemas principales de mezcla:

1. Sistemas adhesivo más activador
2. Sistemas bicomponentes

Los diversos ensayos realizados sobre adhesivos acrílicos muestran su excelente durabilidad (resistencia a la fatiga, a agentes medioambientales, propagación de la rotura, efecto de la holgura de adhesión, diseño de la junta) comparado con los adhesivos estructurales más conocidos. Presentan además tiempos de manipulación muy cortos.

Las ventajas de los acrílicos son las siguientes:

- Versatilidad.
- Resistencia hidrolítica y permanencia en diversos medios agresivos.
- Dosificación versátil.
- Excelente relación precio-rendimiento.
- Preparación superficial mínima o innecesaria para metales y plásticos.
- Propiedades físicas estructurales o de resistencia frente a cargas.
- Cierta capacidad de relleno de holgura (hasta 3 mm)

3.5. PRUEBAS PRELIMINARES: VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

Un aspecto importante a tener en cuenta para el desarrollo de la instalación experimental es hasta dónde o qué longitud de la fibra óptica es la mínima necesaria que debe cubrir el pegamento para evitar el deslizamiento de la fibra. Para ello se realizaron una serie de experimentos, con la fibra óptica AFS50/125Y con pegamento epoxy transparente. Así como el tipo de recubrimiento que se adhiriera mejor al pegamento, por lo cual se realizaron experimentos con diferentes tipos de fibra óptica.

3.5.1 EXPERIMENTOS CON DIFERENTES LONGITUDES DE FIBRA PEGADAS A LOS TABIQUES

Primeramente, se pegó la fibra solo a dos tabiques (uno del lado fijo y otro del lado móvil de la unidad de traslado), como se muestra en la figura 25.



Figura 25: Experimento con la sujeción de la fibra óptica con el pegamento epóxico solo en dos tabiques – uno fijo y otro móvil (fotografía).

Con este experimento se concluyó que no se recorría o desplazaba la fibra óptica dentro del pegamento, se obtuvo un desplazamiento de los tabiques de 3.54 mm con una fuerza de 74.6 N antes de romperse la fibra (Ver Anexo G).

Como el objetivo fundamental era obtener la longitud mínima de fibra que debe estar cubierta de pegamento se continuó con los experimentos, en esta ocasión solo se pegó 1/5 del tabique aproximadamente 45 mm de fibra fue cubierta con pegamento, como se muestra en la figura 26.

Se obtuvieron resultados similares al caso anterior tampoco se desplazó la fibra, se llegó a un desplazamiento de 4.74 mm de los tabiques con una fuerza de 90 N antes de que se rompiera la fibra. (Ver Anexo H).



Figura 26: Experimento con la sujeción de la fibra óptica con el pegamento epóxico en una longitud de 45 mm solo en dos tabiques – uno fijo y otro móvil (fotografía).

Posteriormente se realizó el experimento con 10 mm aproximadamente de fibra pegada a los tabiques de cada lado de la unidad de traslado como se muestra en la figura 27. Este experimento demostró que esa longitud de fibra pegada no es suficiente pues a los 2.89 mm se rompió el pegamento y empezó a desplazarse la fibra y no se logró romper (Ver Anexo I).



Figura 27: Experimento con la sujeción de la fibra óptica con el pegamento epóxico en una longitud de 10 mm en dos tabiques – uno fijo y otro móvil (fotografía).

Con estos experimentos se corroboró que pegando un ladrillo a cada lado sería suficiente para evitar el deslizamiento de la fibra dentro del pegamento, sin embargo, en la mayoría de los experimentos se pegó la fibra óptica a dos ladrillos a cada lado de la unidad de traslado para obtener resultados mucho más precisos.

3.5.2 EXPERIMENTO CON FIBRA JUMPER MULTIMODO 62.5/125

Se deseaba determinar qué efecto tendría utilizar otro tipo de recubrimiento (diferente al acrílico), para ello se utilizó el jumper multimodo 62.5/125, el cual tiene un recubrimiento riser retardante a la flama, este se pegó con pegamento epóxico transparente, como se muestra en la figura 28.

A los 4.58 mm con una fuerza de 54.4 N, se rompió el pegamento y no se observó desplazamiento de la fibra en el interior del pegamento, (Ver Anexo J). Se continuó con el experimento llegando a obtener un desplazamiento de 102.99 mm con una fuerza de 47 N, producto a que la fibra se estaba deslizando dentro del pegamento, por lo cual nunca se llegó a romper.

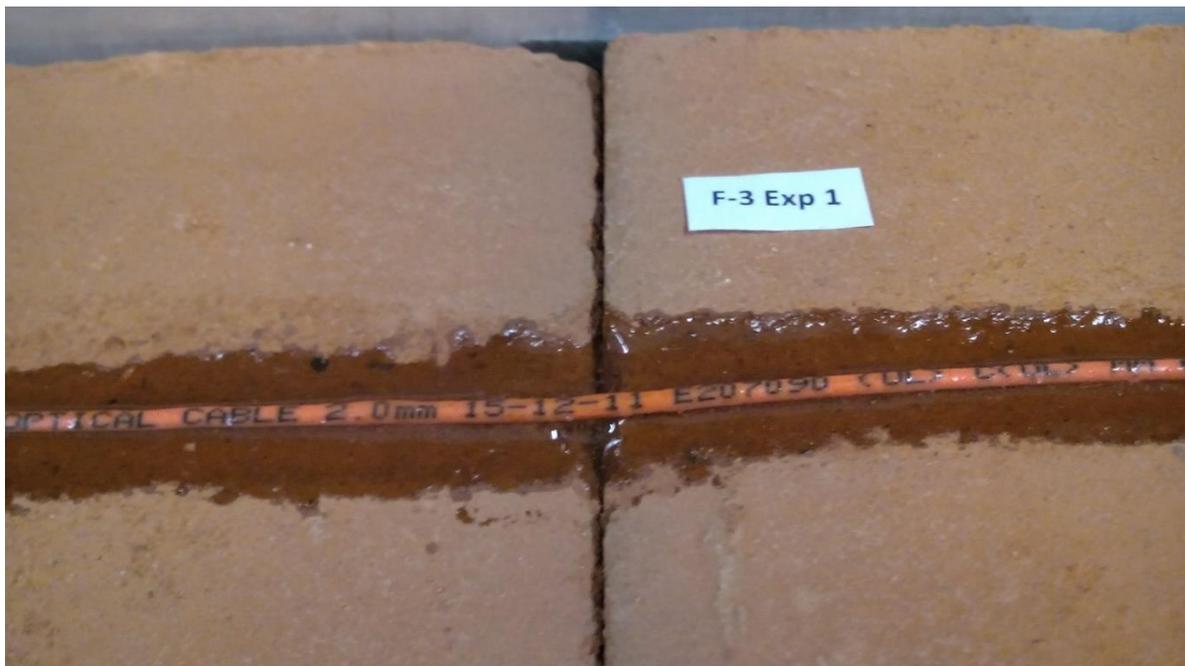


Figura 28: Experimento con fibra óptica jumper multimodo 62.5/125 (fotografía).

Posteriormente se continuó con los experimentos con esta fibra jumper multimodo 62.5/125, pero en esta ocasión se retiró el recubrimiento exterior color naranja, se puede observar en la figura 29. En este caso también se desplazó la fibra dentro del pegamento, se obtuvo un desplazamiento de 98.48 mm con 30 N de fuerza no se llegó a romper la fibra.



Figura 29: Experimento con fibra óptica jumper multimodo 62.5/125 sin recubrimiento externo (fotografía).

Se repitió el experimento, en esta ocasión se aplicó mucho más pegamento para adosar la fibra al tabique, con el objetivo de ver si el desplazamiento anterior había sido producto a la falta de pegamento o realmente la hipótesis que el recubrimiento no es el ideal para utilizar en esta aplicación. Los resultados de este experimento fueron similares al caso anterior, se llegó a obtener un desplazamiento de 127.66 mm con una fuerza de 25.2 N, sin que se rompiera la fibra óptica (Ver Anexo K).

3.5.3 EXPERIMENTO CON FIBRA ÓPTICA FP200ERT

Otro objetivo de la investigación es determinar el tipo de recubrimiento que mejor se adhiere a la superficie del tabique y al pegamento, por lo que se utilizó la fibra FP200ERT con recubrimiento de Tefzel que se considera como hipótesis que no ha de adherirse fácilmente al pegamento. En la figura 30 se observa una imagen del experimento.



Figura 30: Experimento con fibra óptica FP200ERT (fotografía).

Con este experimento se corroboró la hipótesis que se había definido, puesto que la fibra se desplazó dentro del pagamento, no se llegó a romper se obtuvo un valor de desplazamiento de los ladrillos de 160.2 mm con una fuerza de 16.35 N por lo cual se consideró innecesario continuar los experimentos

con este tipo de fibra, puesto que no cumplía los requisitos para su aplicación en la detección de fallas estructurales (Ver Anexo L).

3.5.4 EXPERIMENTO CON FIBRA ÓPTICA DE RECUBRIMIENTO DE POLYIMIDE (POLIAMIDA)

Se consideró interesante comprobar el comportamiento de este tipo de fibra óptica con recubrimiento de poliamida adosándolo a la superficie del tabique con el pegamento epoxy. En la figura 31 se observa la imagen del experimento.

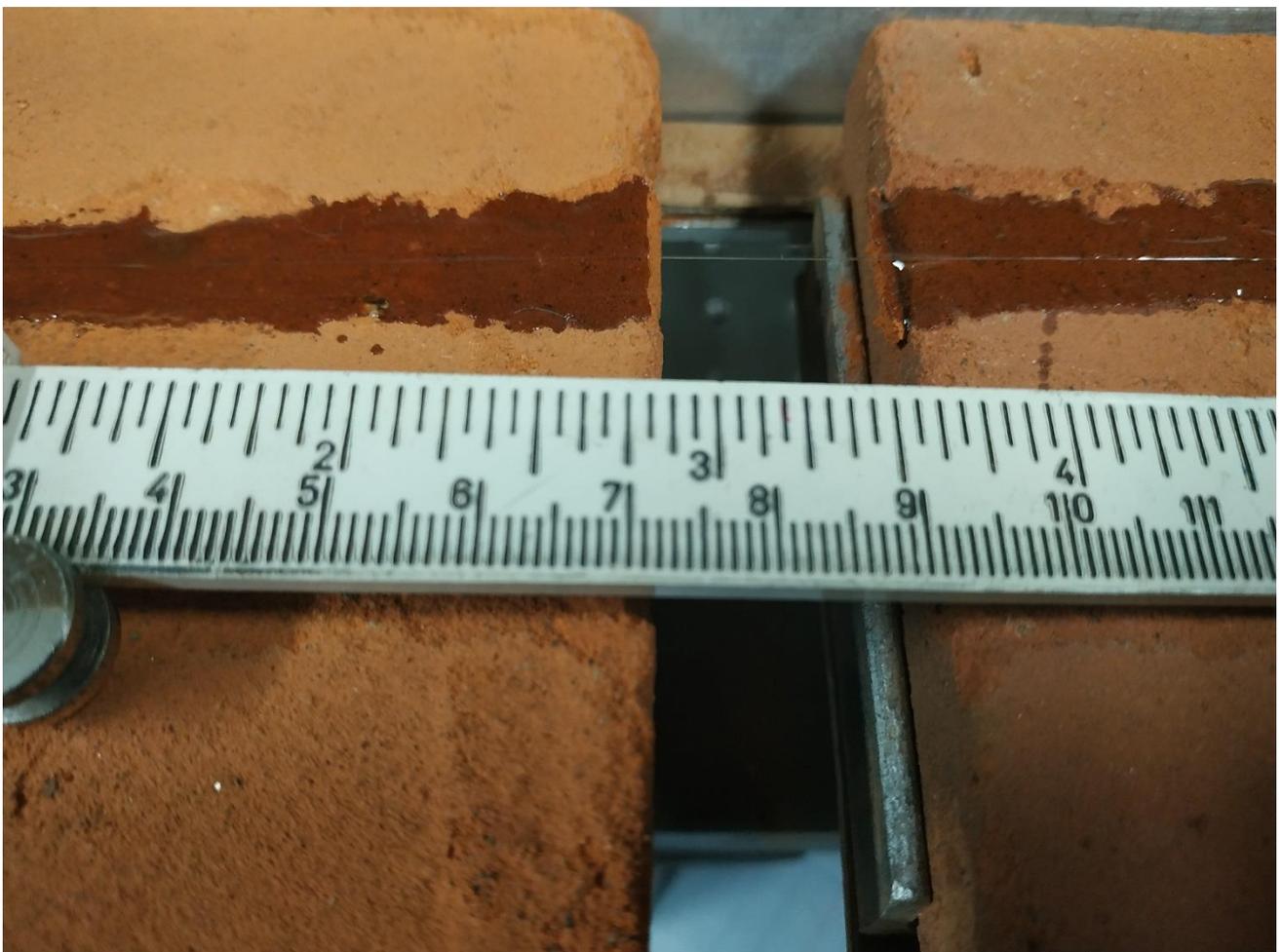


Figura 31: Experimento con fibra óptica revestimiento Poliamida (fotografía).

El experimento arrojó resultados importantes, se obtuvo un desplazamiento de los ladrillos (Δ) de 21.0 mm, con una fuerza (F) de 130 N sin que se llegara a la romper la fibra, producto que se desplazó

dentro del pegamento. No se continuaron los experimentos con esta fibra producto que no cumplía los requisitos para su aplicación en la detección de fallas estructurales.

3.6 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Los resultados de los experimentos fueron sometidos a un tratamiento estadístico, a continuación, se definen la terminología esencial utilizada en el análisis estadístico de los datos [51].

Estadística Descriptiva: Se refiere a aquella parte del estudio que incluye la obtención, organización, presentación y descripción de la información numérica.

Estadística Inferencial: Es una técnica de la cual se obtienen generalizaciones o se toman decisiones con base a información parcial o incompleta obtenida mediante técnicas descriptivas.

Población: Conjunto de todas las posibles observaciones. Sinónimo de Conjunto Universal se le define como la totalidad de todas las posibles mediciones observables, bajo consideración en una situación dada por determinado problema, circunstancias diferentes implican situaciones diferentes.

Muestra: Conjunto de observaciones o medidas tomadas a partir de una población dada, es decir, es un subconjunto de la población. Desde luego, la cardinalidad de la muestra depende de la cardinalidad de la población. Las muestras deben ser representativas para evitar un sesgo u error. El muestreo es la técnica seguida para obtener o extraer una muestra. Su ventaja radica en que nos permite conocer, con un grado de aproximación aceptable, a partir de sus características, las características propias de la población de la cual proviene.

El sesgo: Diferencia que existe entre los datos obtenidos a través de una muestra y los datos reales (normalmente desconocidos) pertenecientes a la población. Puede interpretarse como un error absoluto entre un valor real y uno aproximado.

La Estadística Descriptiva se encarga de la obtención, organización, representación y descripción de los datos. La obtención de los datos se logra a través de las técnicas de muestreo, conforme al diseño del experimento seleccionado. Existen expresiones que permiten trabajar con la totalidad de los datos de la muestra; al arreglo que utiliza la totalidad de los datos se le conoce como datos no agrupados. Cuando los recursos de cómputo son limitados, trabajar con un número alto de datos resulta complicado. Por tal motivo, se conformó un arreglo de datos basado en intervalos conocido como tabla de frecuencias. Cuando se utiliza la tabla de frecuencias se dice que se trabaja con datos agrupados [52].

Rango: Es la diferencia entre el dato mayor y el menor.

Número de intervalos: Es atribución del diseñador del experimento definir el número de intervalos con la recomendación de que no sean ni menos de cinco ni más de quince. No obstante, es posible utilizar como guía las siguientes expresiones:

$$\# \text{ intervalos} = 1 + 3.322 \text{ Log } (n) \quad (31)$$

$$\# \text{ intervalos} = \sqrt{n} \quad (32)$$

Ancho del intervalo (W). Se define como:

$$W = \frac{\text{Rango}}{\# \text{ de intervalos}} \quad (33)$$

Representación gráfica de la distribución de frecuencias. Una forma muy rápida y efectiva de interpretar la información contenida en una distribución de frecuencias consiste en graficar sus elementos [53].

Representaciones Gráficas

- Histograma
- Polígono de frecuencias
- Ojiva de frecuencias

El Histograma es una gráfica de barras o columnas que se construye en un sistema coordinado en cuyo eje horizontal o de abscisas se detallan los intervalos de clase y en el eje vertical o de ordenadas se ubican las frecuencias o las frecuencias relativas.

El polígono de frecuencias es una línea quebrada que une los puntos de intersección de la abscisa que corresponde a la marca de clase con la ordenada que puede ser la frecuencia o la frecuencia relativa. El polígono se cierra con el eje horizontal al iniciarlo en el límite inferior del primer intervalo de clase y concluirlo en el límite superior del último intervalo de clase.

Las ojivas de frecuencias son líneas quebradas que se trazan por los puntos de intersección de las coordenadas que corresponden a las marcas de clase y sus respectivas frecuencias acumuladas o frecuencias acumuladas relativas.

Medidas descriptivas. Estos índices permiten caracterizar a las distribuciones de frecuencias para poder hacer una interpretación acertada de la misma. Ver figura 32.



Figura 32: Resumen de las distribuciones de frecuencias para caracterizar un conjunto de datos [52].

3.6.1. MEDIDAD DE TENDENCIA CENTRAL

Son aquellas medidas que nos proporcionan un dato que, puede considerarse representante de los n datos obtenidos del muestreo [52].

Media: Tradicionalmente se considera como un promedio aritmético de n datos. En realidad, es más que esto. La media pretende representar de la mejor forma a los datos de los cuales proviene. Esta representación puede lograrse de varias formas.

- Media Aritmética

Para datos no agrupados:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (34)$$

donde n es el número total de datos

Como dato representante de una muestra, la media aritmética presenta el problema de los datos ubicados en los extremos de la muestra, los más pequeños y los más grandes, que en la generalidad suelen ser pocos, sesgan o inducen un error en el resultado. La media aritmética nunca debe utilizarse por sí sola para hacer alguna conclusión sobre la muestra, resulta conveniente acompañarla de alguna medida de dispersión.

- Media Ponderada: El promedio ponderado toma en cuenta la existencia de los elementos además de su valor a promediar. Es decir, al tomar en cuenta el número de elementos repetidos minimiza la posibilidad de uno o dos datos extremos modifiquen dramáticamente el resultado.

La media ponderada corresponde directamente al valor esperado o esperanza matemática. Para calcular la media ponderada de n datos (datos no agrupados) es necesario contar todos ellos para establecer cuántos de ellos se repiten. En la práctica, esto implica ordenarlos, motivo por el cual no se acostumbra su cálculo en esta modalidad.

- Media geométrica:

$$X = \sqrt[n]{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots X_n} \quad (35)$$

En la práctica suele obtenerse a través de logaritmos:

$$\text{Log}(G) = \frac{1}{n} [\text{Log}(X_1) + \text{Log}(X_2) + \text{Log}(X_3) + \dots + \text{Log}(X_n)] \quad (36)$$

- Media armónica. La media armónica de una serie de números es el recíproco de la media aritmética de los recíprocos de los números.

$$\bar{X} = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n}} \quad (37)$$

en la práctica se utiliza:

$$\frac{1}{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i}}{n} \quad (38)$$

Mediana: Es el dato que divide exactamente a la mitad a la muestra. Existen dos posibles casos de la mediana con datos no agrupados. El primer caso que la muestra esté compuesta por un número impar de observaciones, la mediana es el dato que se encuentra exactamente a la mitad de la muestra ordenada. (de menor a mayor, por ejemplo). El segundo caso cuando la muestra está compuesta por un número par de observaciones, en este caso, la mediana es el promedio de los dos valores centrales.

Moda: Es el elemento de la muestra que más se repite. Una muestra puede tener una o más modas. Cuando todos los elementos de la muestra son diferentes, no tiene sentido hablar de ella.

3.6.2. MEDIDAS DE DISPERSIÓN

Estas medidas reflejan la separación o alejamiento de los elementos de una muestra. Estas medidas deben acompañar a las medidas de tendencia central, particularmente a la media, para evitar los efectos que los datos extremos tienen sobre ellas [53].

Varianza: Tal y como la define la probabilidad, la varianza de una variable aleatoria es el segundo momento de la misma con respecto a la media. Se interpreta de la misma forma, como un promedio de las distancias de cada dato hacia la media.

Momentos para datos no agrupados:

$$m_K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^K \quad (39)$$

Para datos no agrupados la varianza se define como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (40)$$

Esta fórmula puede expresarse de una forma más sencilla a partir del desarrollo del binomio al cuadrado:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2 \quad (41)$$

Desviación estándar: Es fácil de percibir, a partir de un análisis dimensional, que la varianza posee las unidades de la variable muestreada elevada al cuadrado. Esta situación no permite una rápida visualización o interpretación de la dispersión de los datos. También es conocida como desviación típica o error estándar.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (42)$$

Desviación media: Promedio de las distancias de cada dato con respecto a la media, para ello debe obtenerse el valor absoluto de la distancia entre ambos puntos y después obtenerse su promedio. De tal forma, la desviación media (para datos no agrupados) se define como:

$$\text{Desviación Media} = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (43)$$

Es necesario comentar que debido a las complejidades que implica el manejo del valor absoluto, estos conceptos no son muy socorridos.

3.6.3 ASIMETRÍA

Esta medida, también llamada sesgo, tiene como finalidad mostrar hacia qué lado de la media se ubican más datos. Corresponde al tercer momento con respecto a la media determinar esta situación. No obstante, en situación similar a lo que ocurre con la varianza, el tercer momento posee las unidades de la variable muestreada elevada al cubo [51].

Con el fin de volver adimensional al tercer momento, se define al coeficiente de asimetría de la siguiente forma:

$$\alpha_3 = \frac{m_3}{(\sqrt{m_2})^3} = \frac{m_3}{(\sigma^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (44)$$

Este coeficiente tiene como referencia al valor cero. Si: $\alpha = 0$ La distribución es simétrica, es decir, existe la misma cantidad de datos a ambos lados de la media.

Esto implica que debe cumplirse la siguiente relación:

$$\bar{X} = med = mod \quad (45)$$

Si: $\alpha < 0$ La distribución es asimétrica negativa, es decir, existen más datos a derecha de la media. Esto implica que debe cumplirse la siguiente relación:

$$mod < med < \bar{X} \quad (46)$$

Si: $\alpha > 0$ La distribución es asimétrica positiva, es decir, existen más datos a izquierda de la media. Esto implica que debe cumplirse la siguiente relación:

$$\bar{X} > med > mod \quad (47)$$

3.6.4. APUNTAMIENTO

Corresponde al cuarto momento con respecto a la media identificar a una medida que auxiliar directamente a las medidas de dispersión. El apuntamiento o curtosis detalla lo puntiagudo o aplastado de una distribución. Una distribución puntiaguda implica que los datos están más cercanos a la media lo que a su vez arroja una varianza pequeña. En caso contrario, una distribución aplastada implica que los datos se alejan de la media, lo que implica una varianza grande [51].

El cuarto momento con respecto a la media posee las unidades de la variable muestreada elevadas a la cuarta potencia. Para mejorar una posible interpretación, se define al coeficiente de apuntamiento o coeficiente de curtosis:

$$\alpha^4 = \frac{m_4}{(m_2)^2} = \frac{m_4}{(\sigma^2)^2} \quad (48)$$

3.7. CONCLUSIONES

1. El diseño de la instalación experimental fue adecuado para el modelado físico del agrietamiento de la mampostería de tabique, pudiendo determinar la fuerza ejercida sobre la fibra hasta su rompimiento.
2. Se determinó que el recubrimiento de Tefzel, Poliamida (Polyimide) y el Jumper Multimodo 62.5/125 no se adhiere al pegamento epoxy, no se llegan a romper, por lo cual no pueden ser utilizada para la aplicación en cuestión. Por tanto, se centrarán los experimentos con las fibras ópticas con recubrimiento de acrílico que se adhiere mejor a la superficie del tabique.
3. Se demostró que la longitud de fibra óptica que debe estar fijada a la superficie del tabique, para evitar deslizamiento dentro del pegamento epoxy debe ser mayor a 45 mm.
4. Con el tratamiento estadístico de los resultados experimentales, se puede llegar a dar un criterio certero de desplazamiento (Δ) que estará correlacionado con el tamaño de la grieta.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. EXPERIMENTOS FIBRA AFS105/125Y CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE

Se realizaron un total de 10 pruebas con la fibra óptica AFS105/125Y, con el objetivo de determinar el desplazamiento máximo de los ladrillos, que será el tamaño de la grieta que se puede medir con este tipo de fibra, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3: Resultados de los experimentos fibra AFS105/125Y pegamento epoxy transparente.

Pruebas Fibra AFS105/125Y	Desplazamiento Máximo Δ (mm)	Fuerza F(N)
1	2.60	53.0
2	1.75	70.0
3	3.31	83.6
4	1.58	65.0
5	4.83	81.5
6	1.30	158.0
7	3.73	66.2
8	3.06	61.8
9	4.07	75.6
10	5.28	80.0

En la figura 33 se muestra en el eje x la separación de los tabiques que sería el ancho de la grieta contra el número de experimentos eje y. Esta gráfica es una manera de agrupar el número de experimentos que coincidieron en un determinado rango de separación de los tabiques, con el objetivo de determinar en qué rango se ubica la mayor cantidad de experimentos. Por ejemplo, de los experimentos realizados 3 arrojaron una separación de tabique entre 1-2 mm y otros 3 entre 3-4 mm, 1 experimento solamente estuvo entre 2-3 mm así como uno solo entre 5-6 mm. Mientras que 2 experimentos la separación de los tabiques estuvo entre 4-5 mm, llegando así al total de experimentos que fueron 10.

En resumen, los desplazamientos obtenidos con la fibra AFS105/125Y se encuentran entre 1-6 mm, presentando una mayor ocurrencia de experimentos en el rango de 1-2 mm y en el 3-4 mm con un número de tres experimentos en cada caso.

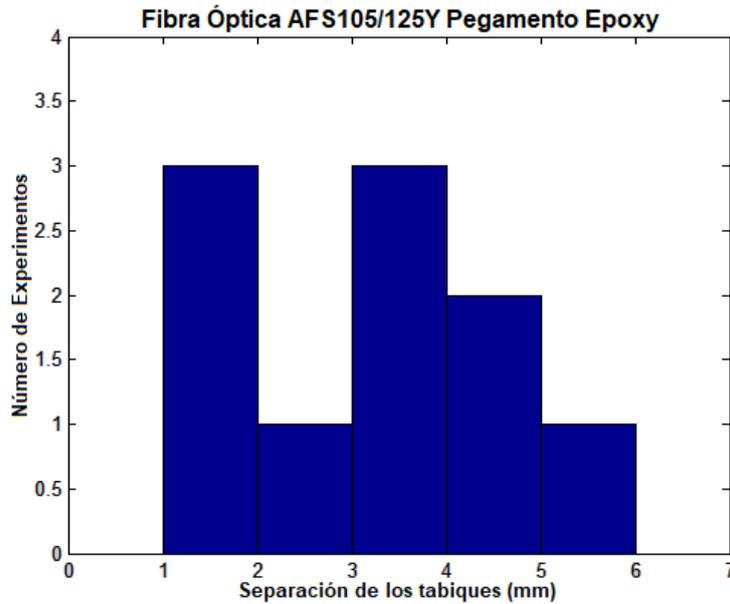


Figura 33: Gráfica de Separación de los tabiques para fibra AFS105/125Y pegamento Epoxy.

Con esta serie de experimentos se observó que en ocasiones se requería de una fuerza mucho mayor para despegar los ladrillos, lo que provocó en muchos casos que se rompiera la fibra junto con el pegamento, razón por la cual los desplazamientos obtenidos son relativamente bajos y la fuerza soportada por la fibra mayor. Por ejemplo, para el experimento 6, el desplazamiento es de 1.3 mm producto que se rompió la fibra al mismo tiempo que el pegamento con una fuerza de 158 N, mientras que el experimento 8 el pegamento se rompió a 2.75 mm, y la fibra se rompió hasta el 3.06 mm, con una fuerza de 61.8 N (Ver Anexo B). El experimento 9 arroja un desplazamiento mayor, rompiéndose el pegamento a los 3.04 mm, la fibra se rompió a los 4.07 mm con una fuerza de 75.6 N, demostrando que este tipo de fibra soporta mayores desplazamientos.

4.2. EXPERIMENTO FIBRA AFS50/125Y CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE

Se realizaron pruebas con la fibra AFS50/125Y, esta fibra presenta el núcleo más pequeño que la AFS105/125Y utilizada en la sección anterior, lo que provocó un ligero problema al acoplar la fibra al laser, se continuó la serie de 10 experimentos, los resultados de esas pruebas se muestran en la siguiente tabla.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4: Resultados de los experimentos fibra AFS50/125Y pegamento epoxy transparente.

Pruebas Fibra AFS50/125Y	Desplazamiento Máximo Δ (mm)	Fuerza F(N)
1	1.05	111.2
2	1.30	124.6
3	1.19	74.2
4	2.90	114.2
5	2.70	61.4
6	3.43	124.0
7	2.76	90.0
8	2.41	103.2
9	2.11	77.2
10	1.25	89.2

Con esta segunda fibra de diámetro menor se llegó a conclusiones muy parecidas al caso anterior, producto que el pegamento en ocasiones pegaba los ladrillos había que hacer una fuerza muy grande para poder separar los tabiques. En el experimento #5 por ejemplo se rompió el pegamento antes de la fibra a los 2.43 mm y alcanzó un desplazamiento de 2.70 mm (Ver Anexo C), en el experimento #6 se cuarteó el pegamento a los 2.77 mm de desplazamiento y se llegó a un desplazamiento total de 3.43 mm.

En la figura 34 se muestra los resultados de los experimentos para el caso de fibra AFS50/125Y.

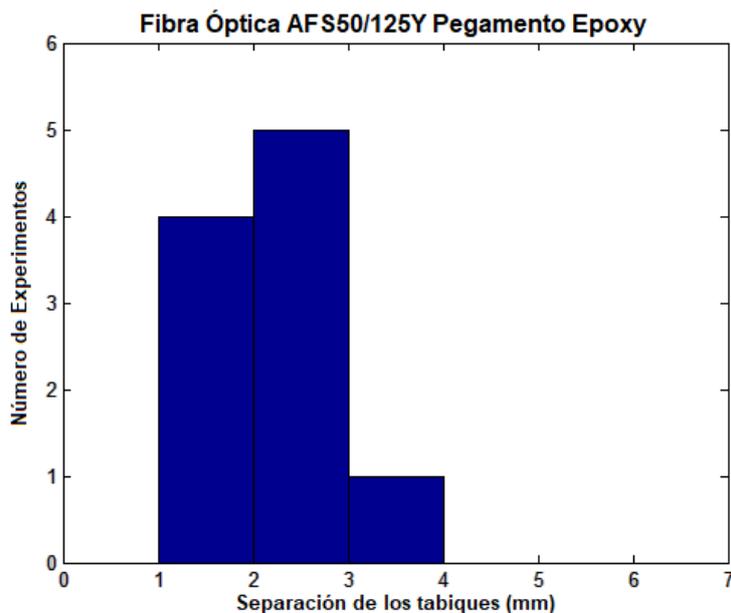


Figura 34: Gráfica de Separación de los tabiques para fibra AFS50/125Y pegamento Epoxy.

En la figura 34 se aprecia que el rango de separación detectado con esta fibra disminuye, se encuentra entre 1-4 mm encontrándose el mayor número entre los 2-3 mm, en este rango se encuentra el 50 % de los experimentos.

4.3. EXPERIMENTO FIBRA AFS105/125Y CON PEGAMENTO ACRÍLICO

Se continúan los experimentos con la fibra AFS105/125Y esta ocasión se cambió el pegamento con el cual se adhiere la fibra a los tabiques, utilizándose el pegamento acrílico. Se realizaron un total de 7 experimentos, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5: Resultados de los experimentos fibra AFS105/125Y pegamento acrílico.

Pruebas Fibra AFS105/125Y	Desplazamiento Máximo Δ (mm)	Fuerza F(N)
1	7.28	82.6
2	8.00	73.2
3	2.57	51.9
4	6.21	66.8
5	4.88	67.4
6	6.62	52.6
7	6.63	71.0

Con este experimento se llegó a conclusiones importantes, que la fibra AFS105/125Y puede llegar a alcanzar desplazamientos más grandes, ya que el pegamento de acrílico ofrece menos resistencia para despegar los ladrillos, y se pudo caracterizar mejor esta fibra en cuanto a desplazamiento se trata. También se observa que cuando se rompe la fibra en ocasiones llega a despegarse del tabique, demostrándose la poca adherencia de la fibra al tabique con este tipo de pegamento. (Ver anexo D). En la figura 35 se muestran los datos obtenidos para la fibra AFS105/125Y con el pegamento acrílico. Como se observa en la figura, la separación de los tabiques se encuentra entre los 2-9 mm, acumulándose la mayor cantidad de experimentos entre 6-7 mm que coincidieron un total de 3 experimentos en este rango.

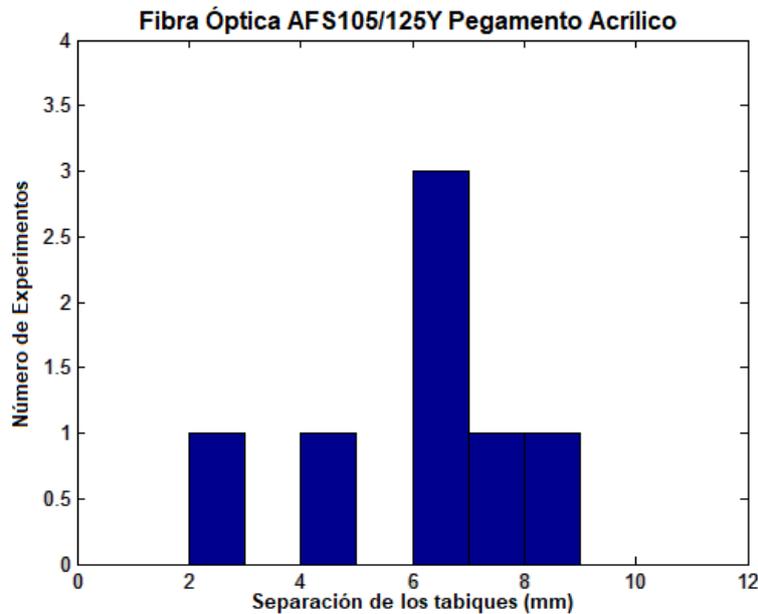


Figura 35: Gráfica de Separación de los tabiques para fibra AFS 105/125Y pegamento Acrílico.

4.4. EXPERIMENTO FIBRA AFS50/125Y CON PEGAMENTO ACRÍLICO

En esta sección se utilizó la fibra AFS50/125Y, se continuó las pruebas con el pegamento acrílico, se repitieron un total de 7 experimentos, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6: Resultados de los experimentos fibra AFS50/125Y pegamento acrílico.

Pruebas Fibra AFS50/125Y	Desplazamiento Máximo Δ (mm)	Fuerza F(N)
1	7.99	57.2
2	6.93	68.0
3	6.75	62.2
4	10.83	64.6
5	9.25	74.2
6	5.54	78.2
7	3.88	55.0

Con la fibra AFS50/125Y se lograron desplazamientos mayores similar al caso anterior con el pegamento acrílico, pero tiene la desventaja este pegamento que en ocasiones la fibra se desplazaba dentro del pegamento, por lo que en algunos experimentos se llegó a tener valores mayores de desplazamiento que los que normalmente presenta la fibra. Por ejemplo, en el experimento #4 la fibra se recorrió dentro del pegamento a partir de los 9 mm aproximadamente llegándose a romper hasta los

10.83 mm, un desplazamiento (Δ) mayor producto al desplazamiento dentro del pegamento. En el experimento #5 a los 7.23 mm también se notó una ligera separación del pegamento, llegando a romperse hasta los 9.25 mm. (Ver anexo E). En la figura 36 se observa la distribución de los experimentos de acuerdo a la separación entre ladrillos.

En este caso se observó que el rango de separación entre los tabiques es mayor se encuentra entre los 3-11 mm, que no se repite ningún experimento en los intervalos únicamente en el intervalo de 6-7 mm que se tienen dos experimentos.

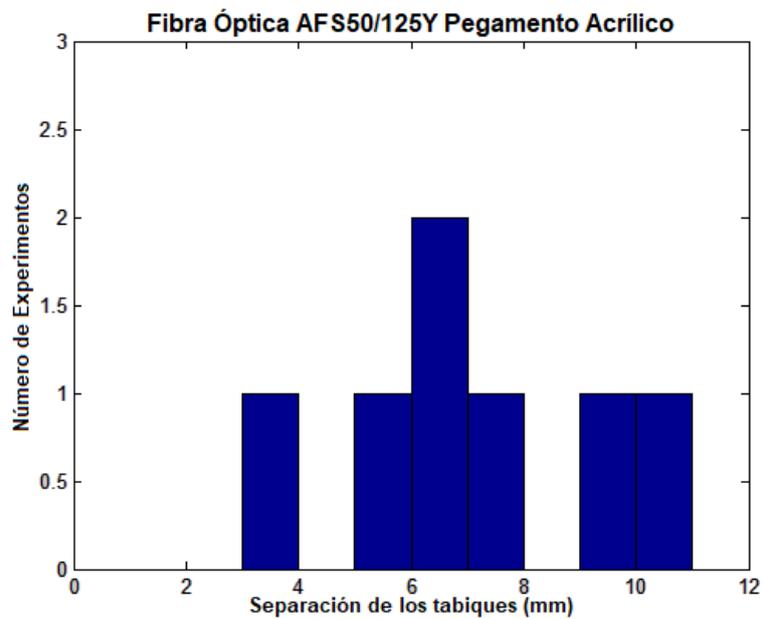


Figura 36: Gráfica de Separación de los tabiques para fibra AFS 50/125Y pegamento Acrílico.

4.5. EXPERIMENTO FIBRA FG200LEA CON PEGAMENTO EPOXY TRANSPARENTE

En esta sección se utilizó la fibra FG200LEA, que presenta un diámetro mayor (200 μ m) con respecto a las fibras anteriormente utilizadas, manteniendo el revestimiento de acrílico. Se consideró de gran importancia ver el efecto del incremento de diámetro. Se utilizó pegamento epoxy transparente, se realizaron un total de 7 experimentos, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Con la fibra FG200LEA se obtuvieron mayores valores de desplazamiento (Δ), así como aumentó la fuerza soportada por la fibra en consecuencia con el aumento del diámetro de la fibra. En estos experimentos se corroboró que tiene gran influencia sobre el desplazamiento final la cantidad de pegamento que se coloca entre los ladrillos, ya que en algunos casos se obtuvieron valores pequeños de desplazamiento, producto a que se necesitaba mucha fuerza para romper el pegamento que unía los

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

ladrillos y se llegaba a romper la fibra junto con el pegamento sin llegar prácticamente a moverse los ladrillos.

Tabla 7: Resultados de los experimentos fibra FG200LEA pegamento epoxy transparente.

Pruebas Fibra FG200LEA	Desplazamiento Máximo Δ (mm)	Fuerza F(N)
1	3.15	138.0
2	7.13	228.0
3	3.45	127.2
4	1.55	136.5
5	6.90	231.0
6	2.20	151.0
7	3.92	120.5

En los experimentos 4 y 6 se obtuvieron los menores desplazamientos ya que se rompió la fibra junto con el pegamento en ambos casos. El desplazamiento máximo se obtuvo con el experimento 2 imágenes que se pueden observar en el anexo F.

En la figura 37 se muestra la distribución de los experimentos de acuerdo al desplazamiento de los ladrillos, el rango de separación entre los tabiques aumentó, se encuentra entre 1-8 mm, el mayor número de experimentos se encuentra en el rango de 3-4 mm, donde coincidieron 3 experimentos.

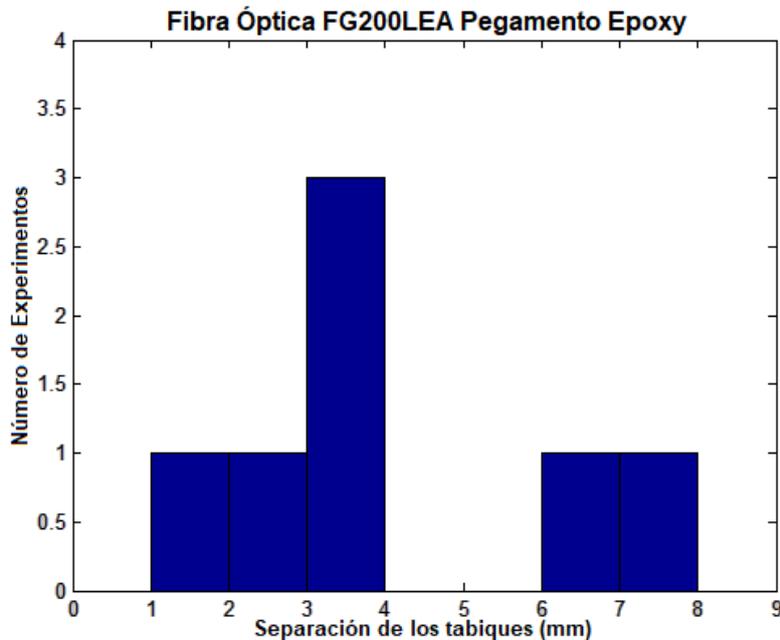


Figura 37: Gráfica de Separación de los tabiques para fibra FG200LEA pegamento Epoxy.

4.6. RESUMEN Y COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE TODOS LOS CASOS

Tabla 8: Parámetros estadísticos de la separación entre los tabiques Δ (apertura de la grieta).

Valores Estadísticos	AFS105/125Y Pegamento Epoxy (1)	AFS50/125Y Pegamento Epoxy (2)	FG200LEA Pegamento Epoxy (3)	AFS105/125Y Pegamento Acrílico (4)	AFS50/125Y Pegamento Acrílico (5)
Rango [mm]	3.98	2.38	5.58	6.57	6.95
Media Aritmética [mm]	3.15	2.11	4.04	6.03	7.31
Media Geométrica [mm]	2.86	1.94	3.55	5.71	6.98
Media Armónica[mm]	2.57	1.78	3.11	5.31	6.63
Mediana [mm]	3.19	2.26	3.45	6.62	6.93
Varianza [mm ²]	1.86	0.73	4.74	3.25	5.33
Desviación Estándar [mm]	1.36	0.86	2.18	1.80	2.31

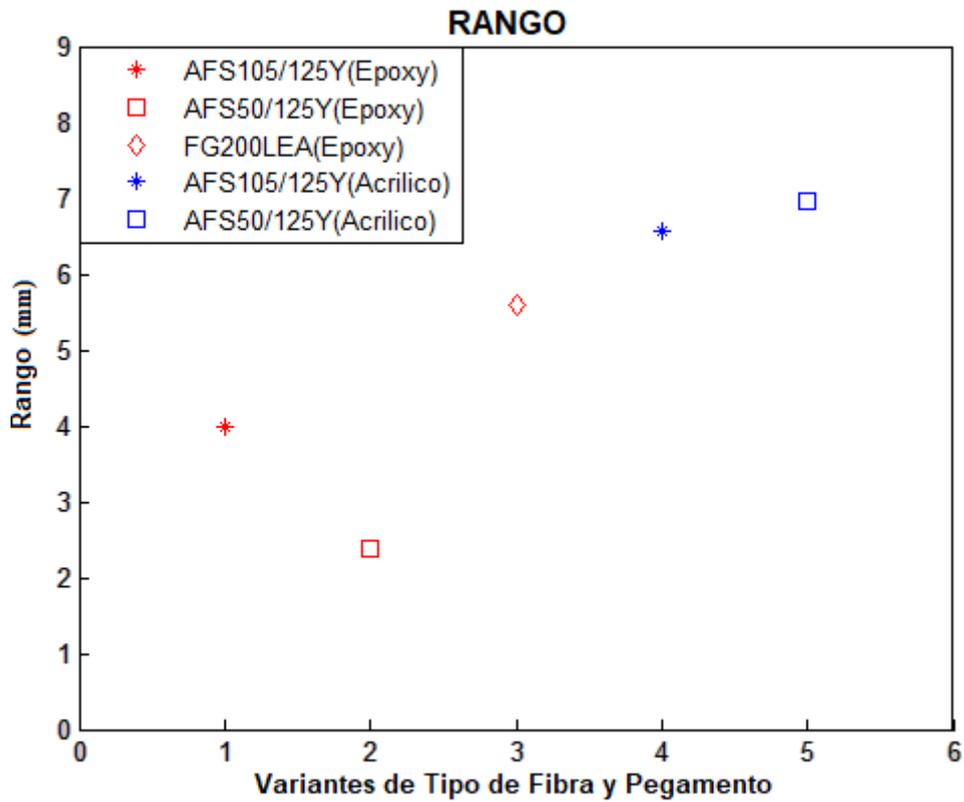


Figura 38: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Rango).

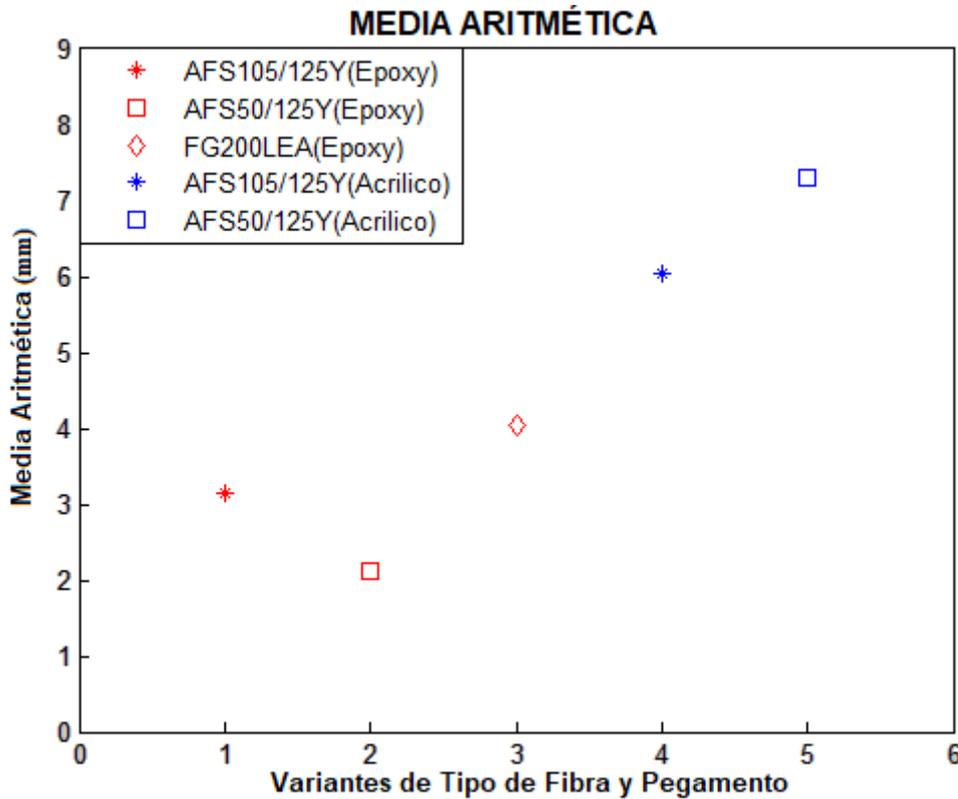


Figura 39: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Media Aritmética).

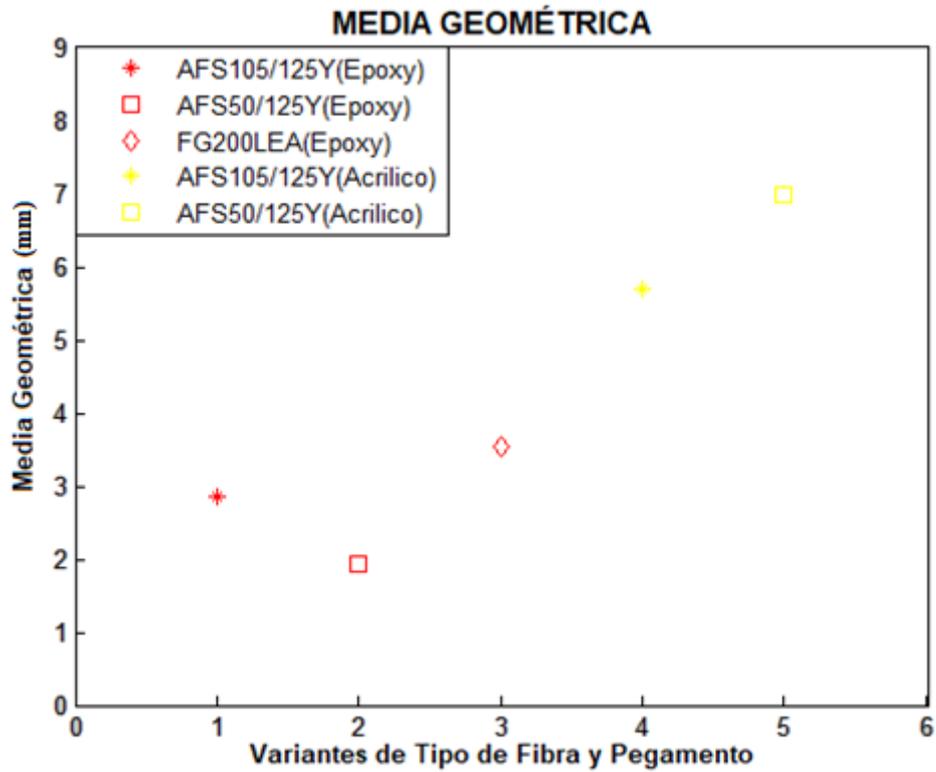


Figura 40: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Media Geométrica).

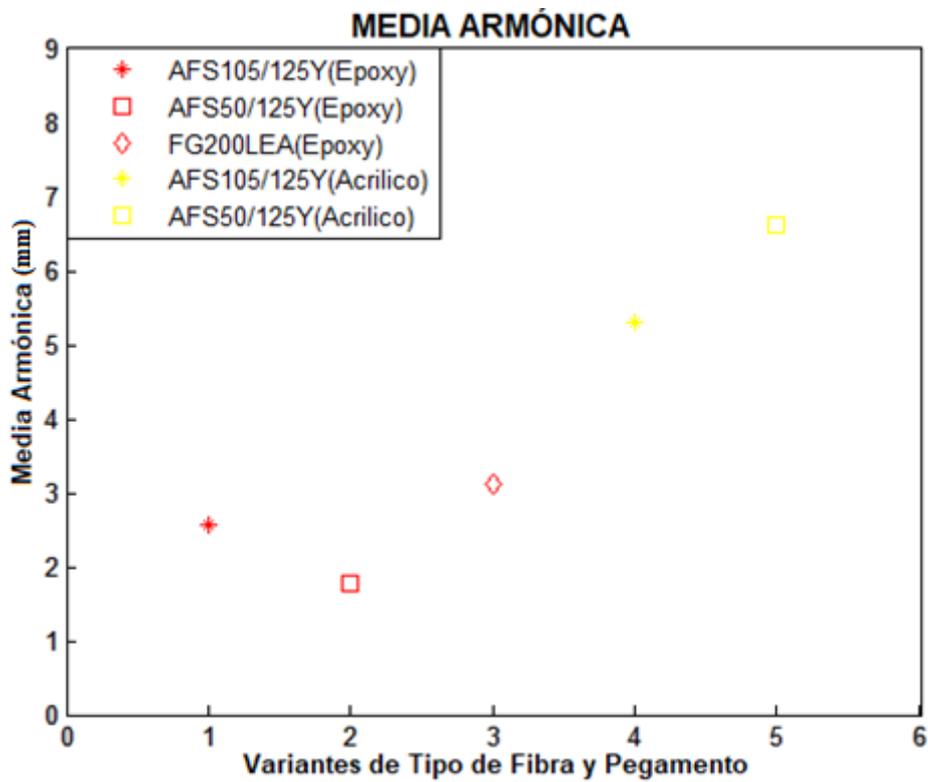


Figura 41: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Media Armónica).

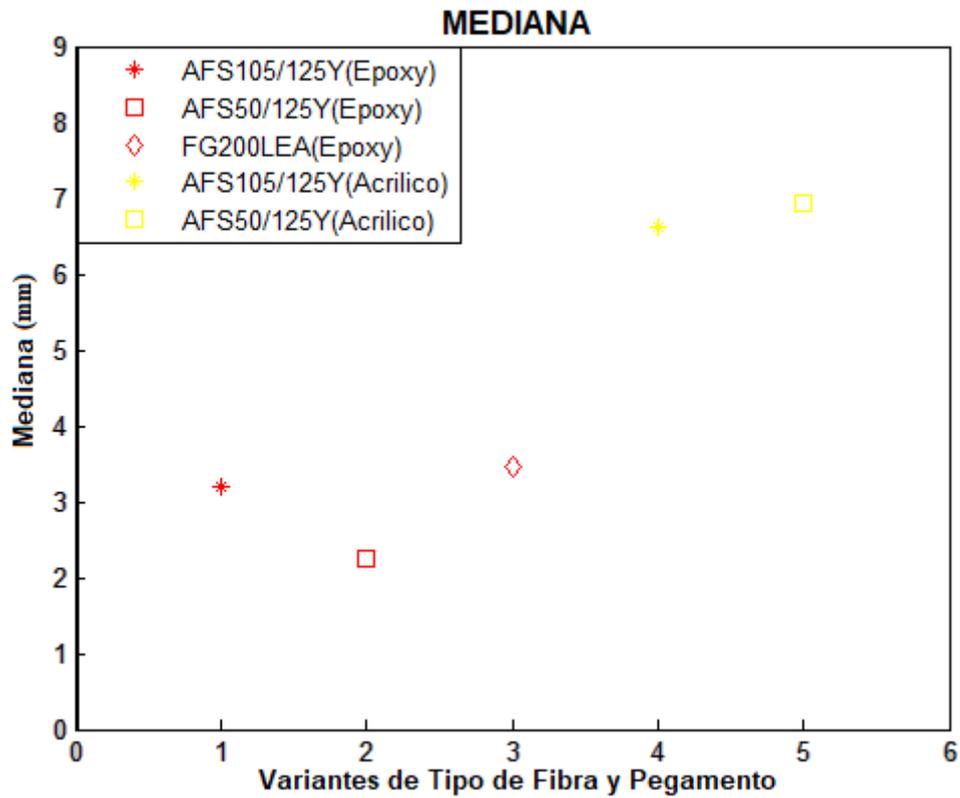


Figura 42: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Mediana).

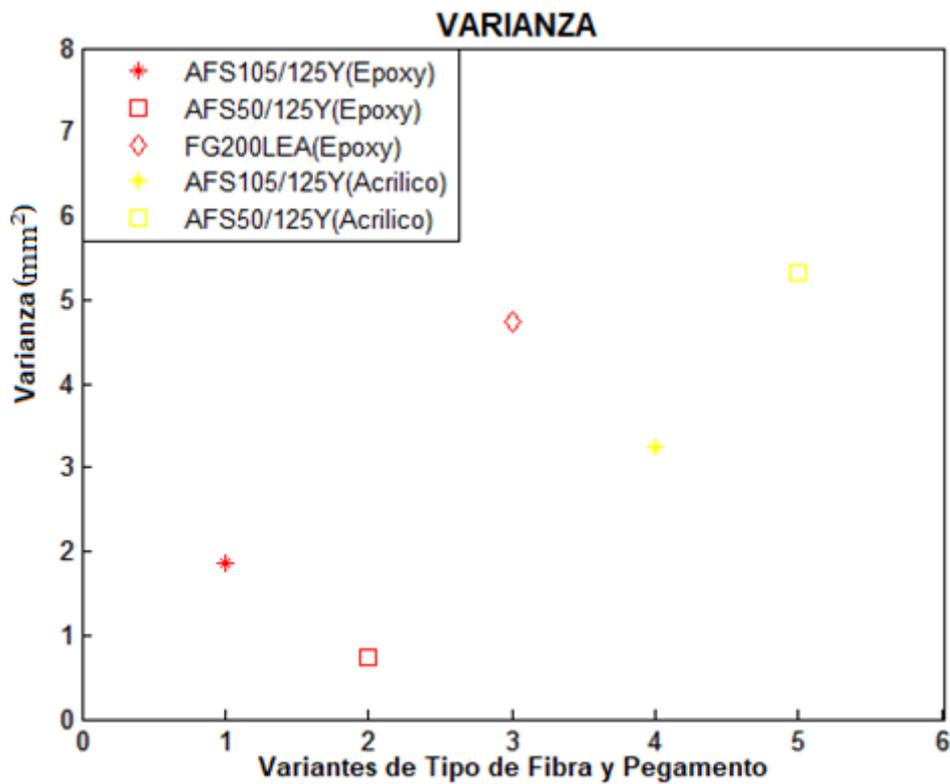


Figura 43: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Varianza).

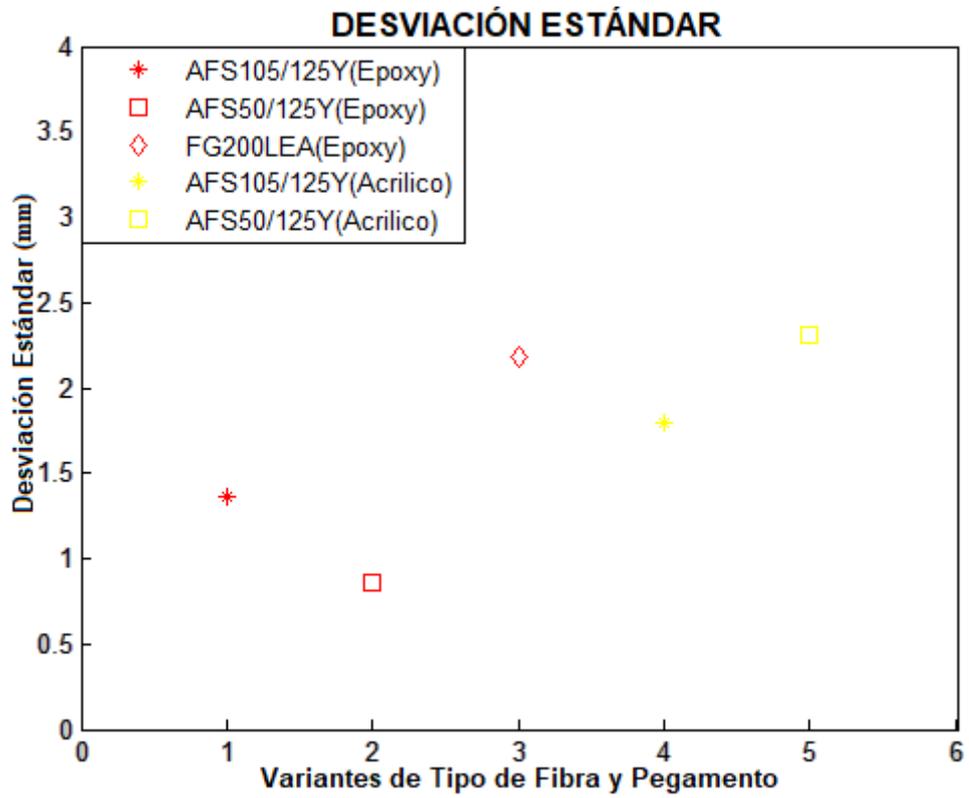


Figura 44: Gráfica de Comparación de Parámetros Estadísticos (Desviación Estándar).

4.7. CONCLUSIONES

1. Las fibras ópticas con recubrimiento de acrílico que se pegaron a la mampostería de tabique con pegamento epoxy arrojaron mejores resultados que las fibras ópticas recubiertas con pegamento acrílico ya que con este último la separación detectada era demasiado grande para la aplicación en cuestión.
2. Con pegamento epoxy se requiere una mayor fuerza para iniciar el desplazamiento de los tabiques, y se adhiere mejor la fibra al tabique también, ya que con el pegamento acrílico se llegó a desplazar la fibra y a despegarse del tabique al romperse.
3. Es necesario prestar atención a la cantidad de pegamento epoxy empleada, producto a que un exceso de éste entre los ladrillos, provoca un aumento considerable de la fuerza y que se lleguen a detectar menores desplazamientos ya que se rompe la fibra junto con el pegamento prácticamente sin desplazarse los tabiques.
4. Se considera que la fibra más adecuada para la detección de fallas es la AFS105/125Y, por presentar una media aritmética de 3.15 mm, es decir, no es susceptible a desplazamientos pequeños que serían insignificantes para la estructura. Pudiendo detectar con este tipo de fibra óptica grietas en la categoría de severo ($AG > 0.60$ mm) y el grado de daño de la mampostería de V que es para anchuras de grietas mayores de 1mm.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

1. La naturaleza no conductiva de materiales dieléctricos ópticos y su inmunidad al ruido, interferencias electromagnéticas, rayos, descargas atmosféricas y corrientes parásitas electro químicas, así como el gran ancho de banda de la fibra óptica en comparación con cable de cobre, coloca al sistema de fibra óptica con ventajas competitivas en comparación con sistemas existentes eléctricos para la detección de fallas estructurales, lo cual ha propiciado la migración de los sistemas eléctricos o electrónicos a los sistemas ópticos, con la fibra óptica en lugar de cables eléctricos como sensor y medio de transmisión de datos.
2. La técnica de detección de agrietamiento en los elementos estructurales basada en el empleo de las fibras ópticas como testigos (indicadores) de daño estructural tiene perspectivas amplias de empleo en el monitoreo de edificaciones, pero varias características de esta técnica merecen de un profundo estudio cuantitativo.
3. Por medio de una serie de pruebas experimentales realizadas en una instalación para el modelado físico de la apertura de una grieta en la mampostería de tabique, se realizó un estudio de la relación entre los parámetros de la fibra óptica y la abertura de la grieta en la mampostería de tabique, a la cual la fibra óptica se rompe.
4. Se emplearon fundamentalmente dos tipos de fibras con recubrimiento de acrílico, AFS105/125Y y AFS50/125Y. Las cuales presentan características similares como apertura numérica y atenuación, para determinar la influencia de la diferencia de diámetro del núcleo.
5. Se emplearon dos tipos de pegamento para anclar la fibra óptica a los tabiques, pegamento epoxy y acrílico. Los experimentos arrojaron que el pegamento epoxy ancla a las fibras de recubrimiento de acrílico mucho mejor que el pegamento de acrílico, la superficie mínima de fibra que debe ser pegada al tabique es de aproximadamente 45 mm de longitud para evitar deslizamiento de la fibra, mientras que con pegamento acrílico se necesita 230 mm aproximadamente, siendo 5 veces mayor.
6. Se considera que el motivo de la diferencia de comportamiento de los pegamentos radica en la viscosidad del pegamento de acrílico es menor que del pegamento epoxy, por lo cual el pegamento acrílico se absorbe mejor por los tabiques y se queda poco de material de pegamento en la superficie que ancla la fibra óptica. Al ser el pegamento epoxy mucho más denso, cubre mejor la fibra y es mejor la adherencia al tabique.

7. Los desplazamientos (Δ) obtenidos con la fibra AFS105/125Y tiene un rango mayor se encuentran entre 1-6 mm, la mayor coincidencia de experimentos se encontraron en 3-4 mm con un valor de 3. Mientras que, con la fibra AFS50/125Y disminuye este rango a valores entre 1-4 mm y el mayor número de experimentos se encontraron entre 2-3 mm con una cantidad de 5 experimentos.
8. Con dichos resultados experimentales se observó que la diferencia entre estas fibras era mínima en cuanto a desplazamiento, por tanto, se utilizó la fibra FG200LEA, que presenta un revestimiento de acrílico, pero aumenta el diámetro del núcleo a 200 μm y el de revestimiento a 220 μm . Con esta fibra el rango de separación entre los tabiques aumentó, se encuentra entre 1-8 mm, el mayor número de experimentos se encuentra en el rango de 3-4 mm, donde coincidieron 3 experimentos.
9. Se realizaron experimentos con fibras de recubrimiento Tefzel, Poliamida y con el Jumper Multimodo 62.5/125, en estos casos no se logró romper las fibras ópticas debido al desplazamiento de las mismas dentro del pegamento, demostrando que estos recubrimientos no eran adecuados para la aplicación en cuestión.
10. Considerando todo lo anterior, los resultados de este trabajo demuestran que el mejor tipo de la fibra para la presente aplicación es la fibra óptica con recubrimiento de acrílico, y el mejor pegamento para anclar (fijar) esta fibra óptica en la superficie de tabique es pegamento epoxy.
11. La apertura de grieta en la mampostería de tabique a la que se rompe la fibra óptica depende principalmente del diámetro de hilo central de sílice de la fibra óptica que integra la guía óptica: el núcleo y revestimiento de cuarzo. En este trabajo se obtuvo que la media aritmética de la apertura de la grieta en la mampostería de tabique a que se rompe la fibra óptica de diámetro de revestimiento de 125 μm es de 3.15 mm y una varianza $\sigma = 1.86 \text{ mm}^2$. La media aritmética de la apertura de la grieta en la mampostería de tabique a que se rompe la fibra de diámetro de revestimiento de 225 μm es de 6.03 mm con una varianza $\sigma = 4.74 \text{ mm}^2$.
12. Se considera que con fibras ópticas de diámetros diferentes se puede detectar grietas de menor y mayor ancho en comparación con los valores que se obtuvo en el presente trabajo. Es decir, a mayor diámetro de la fibra óptica, mayor será la apertura de grieta detectada por la fibra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. W. Sons, *Fiber Optic Sensor: "An Introduction for Engineers and Scientists"*. A Wiley-Interscience Publication, 1990.
- [2] Fundación ICA, AC *"Edificaciones de Mampostería para Vivienda"*. Tercera Edición, 2003.
- [3] J. E. G. Tinoco, *"Redes de Fibra Óptica de Monitoreo de Salud de Estructuras"* Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [4] S. J. M. Carrasco, *"Arreglo de Sensores Basados en Fibra Óptica para el Monitoreo de Daño Estructural,"* Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [5] L. A. H. Viveros, *"Sistema de Procesamiento de Señales para una Red de Sensores"* Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [6] E. Hecht. *"Óptica"*, 3ra edición, Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [7] J. Nérou. *"Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas"*, Trillas, 2001.
- [8] F. Jenkins and A. White. *"Fundamentals of Optics"*, Fourth edition, McGraw Hill, 1976.
- [9] P. Agrawal, *"Fiber-Optic Communication Systems"*, 4th Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [10] B. Saleh and M. C. Teich, *"Fundamentals of Photonics"*, John Wiley and Sons, 1991.G.
- [11] K.C. Kao and G.A. Hockham, *"Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies"* Optoelectronics, IEEE Proceedings J, vol.133, no.3, June 1986.
- [12] A. R. Tynes, A. David Pearson, and D. L. Bisbee, *"Loss Mechanisms and Measurements in Clad Glass Fibers and Bulk Glass,"* J. Opt. Soc. Am. 61, (1971).
- [13] R.E.Medrano, *"Mechanical properties of weak optical fibers"*, Proc. SPIE, 1999.
- [14] B. Bergman, *"On the estimation of Weibull modulus"*, J. Materials Science Letter, 1984.
- [15] G.M.Bubel y M.J.Matthewson, *"Optical fiber reliability implications of uncertainty in the fatigue crack growth model"*, Optical Engineering, 1991.
- [16] G.S.Glaesemann y D.J.Walter, *"Method of obtaining long length strength distributions for reliability prediction"*, Optical Engineering, 1991.
- [17] G. Keiser, *"Optical Fiber Communications"*. Second Edition.
- [18] B.D. Zimmermann, *"Compatibility of multiplexed optical fiber sensors with optical communications systems onboard military and commercial aircraft,"* Aerospace and Electronics Conference, 1993. NAECON 1993. Proceedings of the IEEE 1993 National, vol.2.
- [19] M.L. Tuma, T. Sawatari, Yuping Lin and K.A. Elam, *"Flight tests on a fiber optic temperature sensor,"* Digital Avionics Systems Conference, 1998. Proceedings., 17th DASC. The AIAA/IEEE/SAE, vol.1, Oct-7 Nov 1998.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [20] K.R. Cooper, J. Elster, M. Jones and R.G. Kelly, "Optical fiber-based corrosion sensor systems for health monitoring of aging aircraft" AUTOTESTCON Proceedings, 2001. IEEE Systems Readiness Technology Conference.
- [21] G. Fischbeck, R. Moosburger, C. Kostrzewa, A. Achen and K. Petermann, "Single mode optical waveguides using a high temperature stable polymer with low losses in the 1.55 μm range," Electronics Letters, vol.33, no.6, 13 Mar 1997.
- [22] T. Giallorenzi, J. Bucaro, A. Dandridge, G. Sigel, J. Cole, S. Rashleigh and R. Priest, "Optical fiber sensor technology" Quantum Electronics, IEEE Journal, vol.18, no.4, Apr.
- [23] P.E. Green, "Fiber to the home: the next big broadband thing" Communications Magazine, IEEE, vol.42, no.9, Sept. 2004.
- [24] J. Zubia, G. Garitaonaindía, and J. Arrúe, "Passive device based on plastic optical fibers to determine the indices of refraction of liquids", Applied Optics, vol. 39, No.6, Feb 2000.
- [25] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirotte and A. Depre, "Optical Fiber Sensors Embedded Into Medical Textiles for Healthcare Monitoring" Sensors Journal, IEEE, vol.8, no.7, July 2008.
- [26] R. Wolthuis, D. McCrae, E. Saaski, J. Hartl, and G. Mitchell, "Development of a medical fiber-optic pH sensor based on optical absorption" Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, vol.39, no.5, May 1992.
- [27] E. Cibula, D. Donlagic and C. Stropnik, "Miniature fiber optic pressure sensor for medical applications" Sensors, 2002. Proceedings of IEEE, vol.1, 2002.
- [28] G.A. Cranch, P.J. Nash and C.K. Kirkendall, "Large-scale remotely interrogated arrays of fiber optic interferometric sensors for underwater acoustic applications" Sensors Journal, IEEE, vol.3, no.1, Feb. 2003.
- [29] A.W. Domanski, "Application of optical fiber sensors in mechanical measurements" Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997.
- [30] G. Meteen and N. North, "Refractive index measurement of absorbing and turbid fluids by reflection near the critical angle", Meas. Sci. Technol., vol. 6, 1995.
- [31] V. Svirid, S. Khotiaintsev, and P. Swart, "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element", Optical Engineering, vol. 42, no. 5, May, 2002.
- [32] J. M. Baptista, J. L. Santos, and A. S. Lage, "Measurement of refractive index in oils using a self-referenced fiber optic intensity sensor", Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2001, vol. 2, November, 2001.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [33] Y. Zhao, Y. Liao, B. Zhang, and S. Lai, "Monitoring technology of salinity in water with optical Fiber sensor". IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 21, no. 5, May, 2003.
- [34] S. K. J. O. E. O. J. Tinoco., J. Mirón, "Specialized Optical Fiber Sensor Array for Structural Damage Detection" 10th IEEE/IET International Symposium on Communications Systems, Network & Digital Signal Processing, 2016.
- [35] H. J. G.-O. S. K. M. A. Z. B. J. E. Gonzalez-Tinoco, E. R. Gomez-Rosas, "Monitoring of Transverse Displacement of Reinforced Concrete Beams Under Flexural Loading with Embedded Arrays of Optical Fibers," Published in Proceedings of SPIE Vol. 9437 (Paper 24): Structural Health Monitoring and Inspection of Advanced Materials, Aerospace and Civil Infrastructure, 2015.
- [36] J. G.-T. S. Khotiaintsev, A. Beltrán-Hernández, "Structural Health Monitoring of Concrete Elements with Embedded Arrays of Optical Fibers" Published in Proceedings Volume 8695 (paper 39): Health Monitoring of Structural and Biological Systems, 2013.
- [37] T.L Yeo, Y. Yuan, L.F. Boswell, T. Sun, K.T.V. Grattan, "Optical fiber sensors for the measurement of concrete sample properties following exposure to freeze/thaw test", Sensors and Actuators A: Physical Vol 153, 2009.
- [38] Lumentum He-Ne Laser Spec Sheet (<https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-libraryitems/schnl1500-ds-cl-ae.pdf>), September 2018.
- [39] Thorlabs Spec Sheet, Step-Index Multimode Fiber. Thorlabs, www.thorlabs.com September 2018.
- [40] Fibra Óptica Jumper Multimodo 62.5/125, www.optronics.com.mx, September 2018.
- [41] ThorLabs Spec Sheet, PDA36A Switchable Gain Detector. ThorLabs, www.thorlabs.com, July 2017.
- [42] G.L. Schneberger. "Adhesives in manufacturing". Ed.: MARCEL DEKKER, INC. New York (1983).
- [43] "Uso de los cianoacrilatos en la Industria". Mario Madrid. Loctite Spain's Internal Technical Information. Madrid (1997).
- [44] A.V. Tobolsky. "Properties and Structures of Polymers". Copyright John Wiley & Sons. Nueva York (1960).
- [45] ASM International Handbook Committee. Volume 3, ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK. "Adhesives and Sealants". ASM International. (1990).
- [46] J.M. Martín Martínez; A.C. Orgilés Barceló. "Adhesión y adhesivos de contacto". EDITORIAL: INESCOP & Universidad de Alicante. (1991).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [47] J.M. Martín Martínez; A.C. Orgilés Barceló. "*Adhesión. Tecnología y Fundamentos*". EDITORIAL: INESCOP & Universidad de Alicante. (1992).
- [48] R. F. Wegman. "*Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*". Noyes Publications. New Jersey (1989).
- [49] W.A. Lees. "Adhesives in engineering design". The Design Council. Londres (1984).
- [50] W.C. Wake. "Adhesion and the formulation of adhesives". Editorial Dekker. (1983).
- [51] Taro Yamane, "Estadística", Editorial Harla, México 1999.
- [52] Canavos, "Probabilidad y Estadística", Mc. Graw Hill, México 1994.
- [53] J. Kennedy, and A. Neville, "Estadística para Ciencias e Ingeniería", Segunda edición, Harla, 1982.

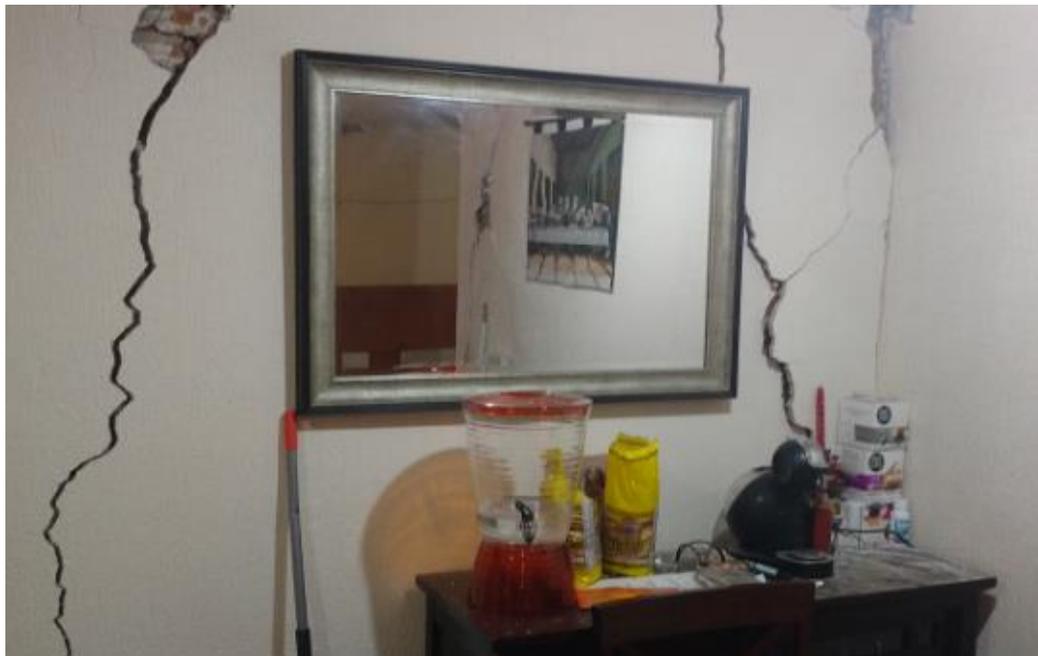
ANEXOS

ANEXO A

IMÁGENES DE DIFERENTES TIPOS DE GRIETAS TRAS EL SISMO DE SEPTIEMBRE 2017, CIUDAD DE MÉXICO



Imágenes de grietas en Monterrey 284, Colonia Roma, Ciudad de México.



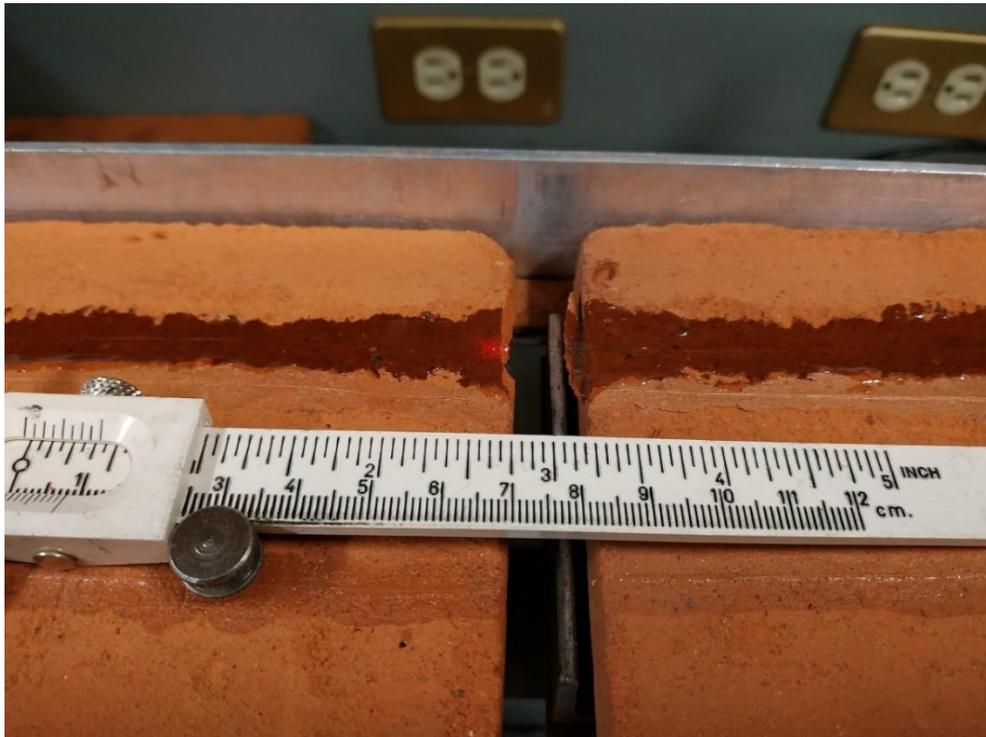
Imágenes de grietas en Monterrey 284, Colonia Roma, Ciudad de México.

ANEXO B

FOTOS DEL EXPERIMENTO #8 FIBRA AFS 105/125Y, PEGAMENTO EPOXY



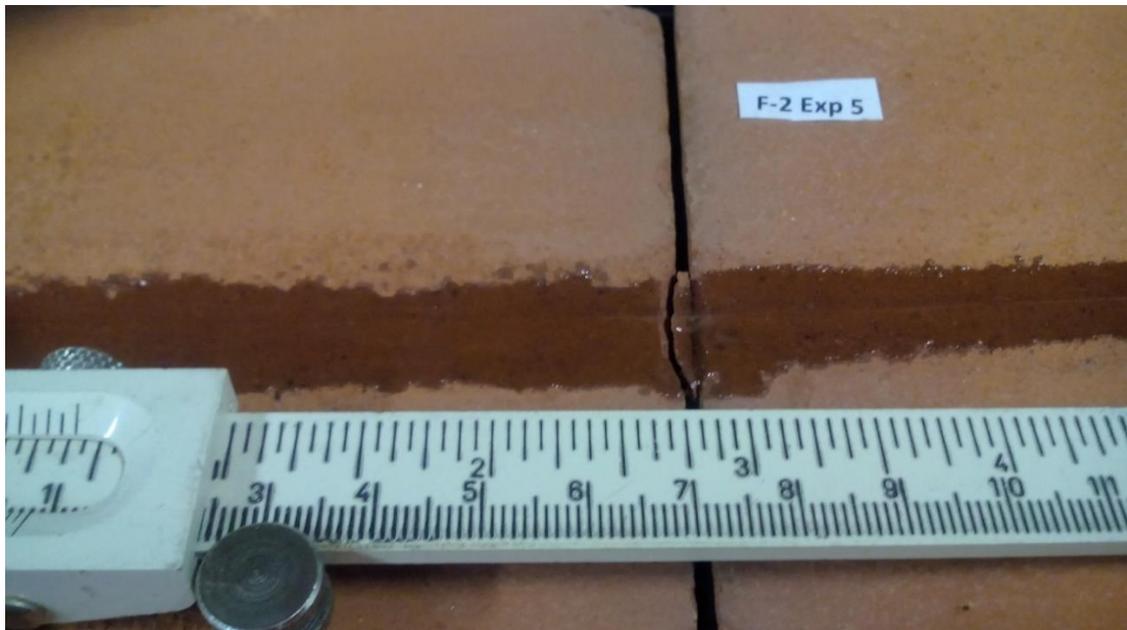
Se rompe el pegamento, comienzan a desplazarse y se observa una pequeña separación de los tabiques ($\Delta=2.75$ mm).



Se rompió la fibra óptica, se observa el rayo de luz saliendo de la fibra, el desplazamiento con que se rompió fue ($\Delta=3.03$ mm).

ANEXO C

FOTOS DEL EXPERIMENTO #5 FIBRA AFS 50/125Y, PEGAMENTO EPOXY



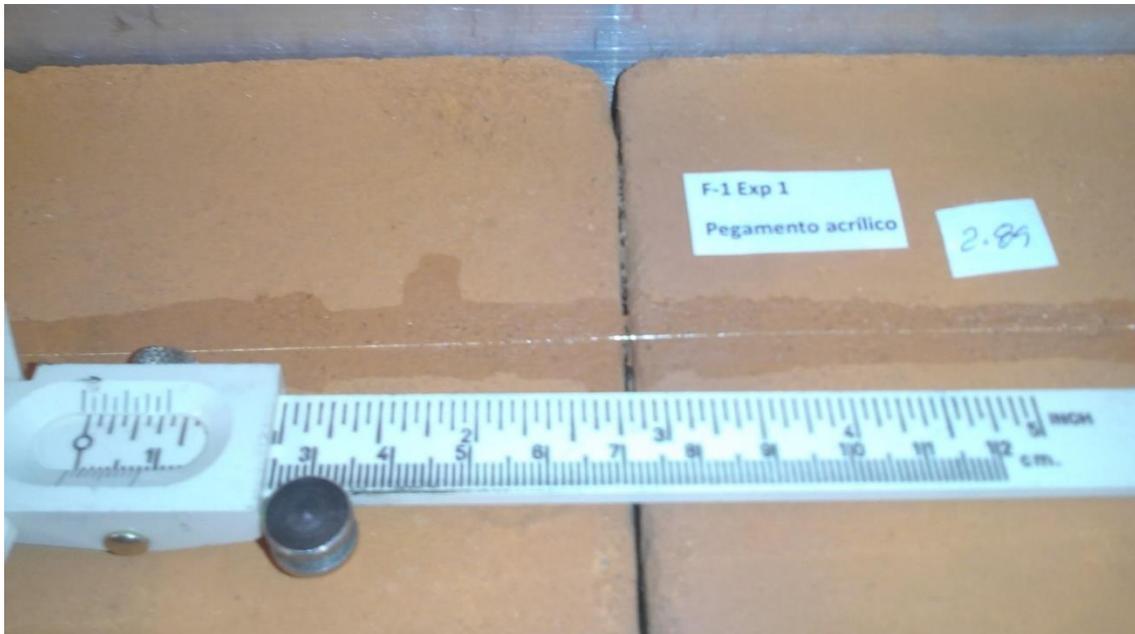
Se rompe el pegamento, comienzan a desplazarse y se observa una pequeña separación de los tabiques ($\Delta=2.43$ mm).



Se rompió la fibra óptica, se observa el rayo de luz saliendo de la fibra, el desplazamiento con que se rompió fue ($\Delta=2.70$ mm).

ANEXO D

FOTOS DEL EXPERIMENTO #1 FIBRA AFS 105/125Y, PEGAMENTO ACRÍLICO



Se comienza a desplazar los tabiques y se observa una pequeña separación de los tabiques ($\Delta=2.89$ mm).



Se rompió la fibra óptica, el desplazamiento con que se rompió fue ($\Delta=7.28$ mm), se muestra como al romperse se despega la fibra del tabique.

ANEXO E

FOTOS DEL EXPERIMENTO #5 FIBRA AFS 50/125Y, PEGAMENTO ACRÍLICO



Se muestra una separación de los tabiques ($\Delta=7.23$ mm), para la cual se observa que la fibra presenta ligeramente despegada del tabique.



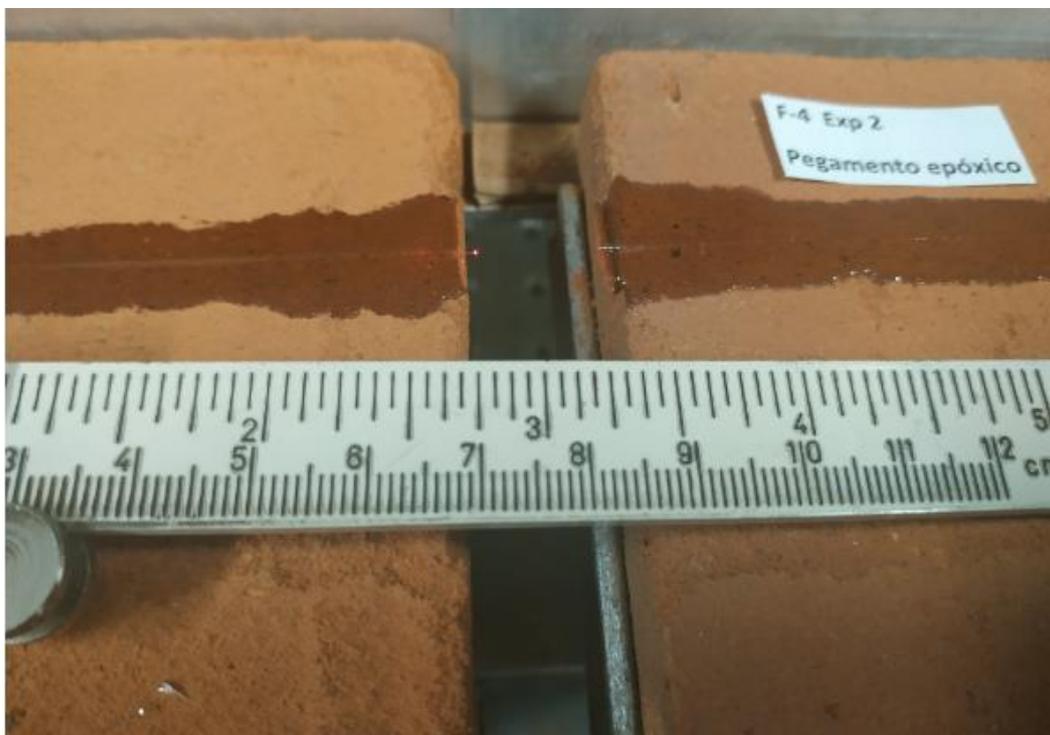
Se rompió la fibra óptica, con un desplazamiento ($\Delta=9.25$ mm), se muestra como al romperse se despega la fibra del tabique.

ANEXO F

FOTOS DEL EXPERIMENTO #4 FIBRA FG200LEA, PEGAMENTO EPOXY



Se rompió el pegamento y se desplazaron los tabiques, se muestra una separación de los tabiques ($\Delta=6.35$ mm).



Se rompió la fibra óptica, se observa el rayo de luz saliendo de la fibra con un desplazamiento ($\Delta=7.13$ mm).

ANEXO G

EXPERIMENTO CON FIBRA AFS105/125Y PEGADA SOLO A DOS TABIQUES UNO FIJO Y UNO MÓVIL, PEGAMENTO EPOXY



Se rompió el pegamento que unía los tabiques, pero la fibra no se rompe, el sensor de desplazamiento marcó $\Delta = 2.38$ mm.



La fibra se rompe con $\Delta = 3.54$ mm, se observa la fibra óptica no se desplazó dentro pegamento.

ANEXO H

EXPERIMENTO CON FIBRA AFS105/125Y PEGADA SOLO A 45 mm DEL TABIQUE A CADA LADO DE LA UNIDAD DE TRASLADO, PEGAMENTO EPOXY



Se agrieta el pegamento a los $\Delta = 2.11$ mm sin que se rompa la fibra ni se desplace dentro del pegamento.



Se rompe la fibra a los $\Delta = 4.74$ mm, sin que se desplace la fibra dentro del pegamento.

ANEXO I

EXPERIMENTO CON FIBRA AFS105/125Y PEGADA SOLO A 10 mm DEL TABIQUE A CADA LADO DE LA UNIDAD DE TRASLADO, PEGAMENTO EPOXY



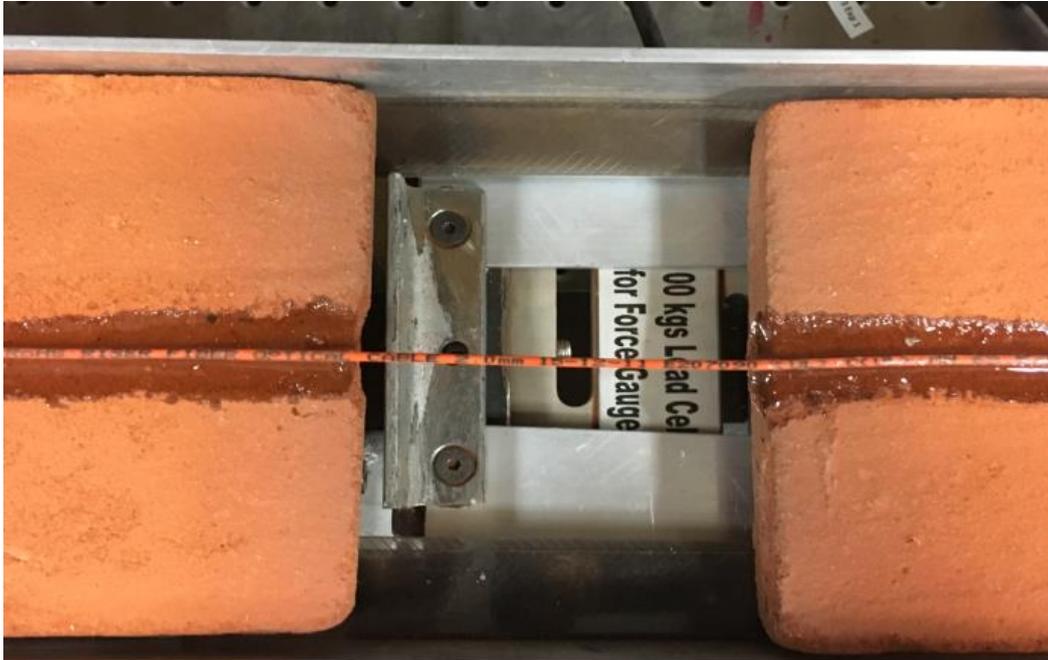
Al romperse el pegamento con un desplazamiento de $\Delta=3.89$ mm, se desplazó la fibra se salió del pegamento y no se rompió.



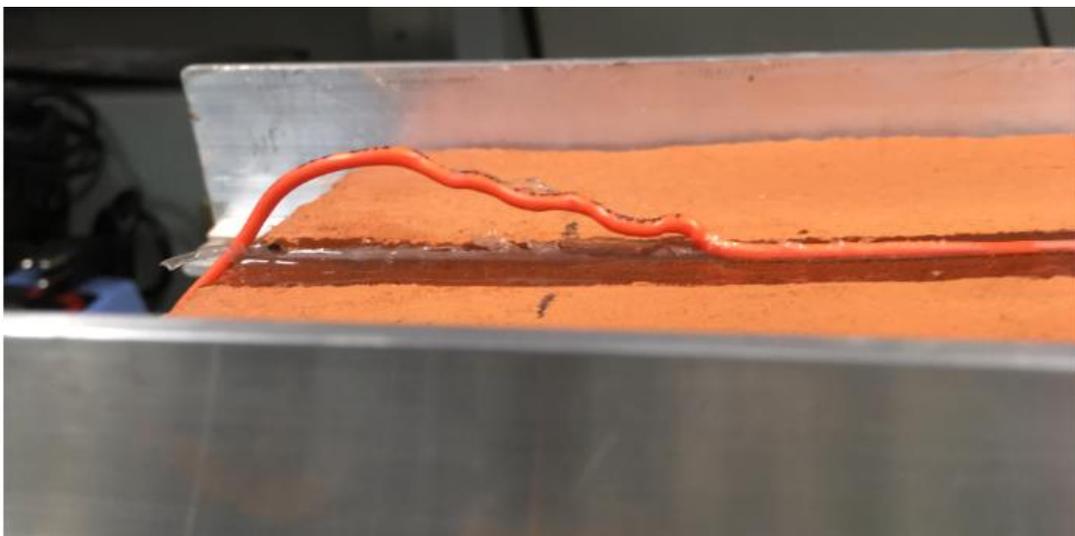
Se observa cómo se salió la fibra completamente del pegamento sin romperse.

ANEXO J

EXPERIMENTO CON FIBRA JUMPER MULTIMODO 62.5/125, PEGAMENTO EPOXY



Se observa un desplazamiento entre los ladrillos $\Delta = 102.99$ mm, se estaba recorriendo del extremo izquierdo.



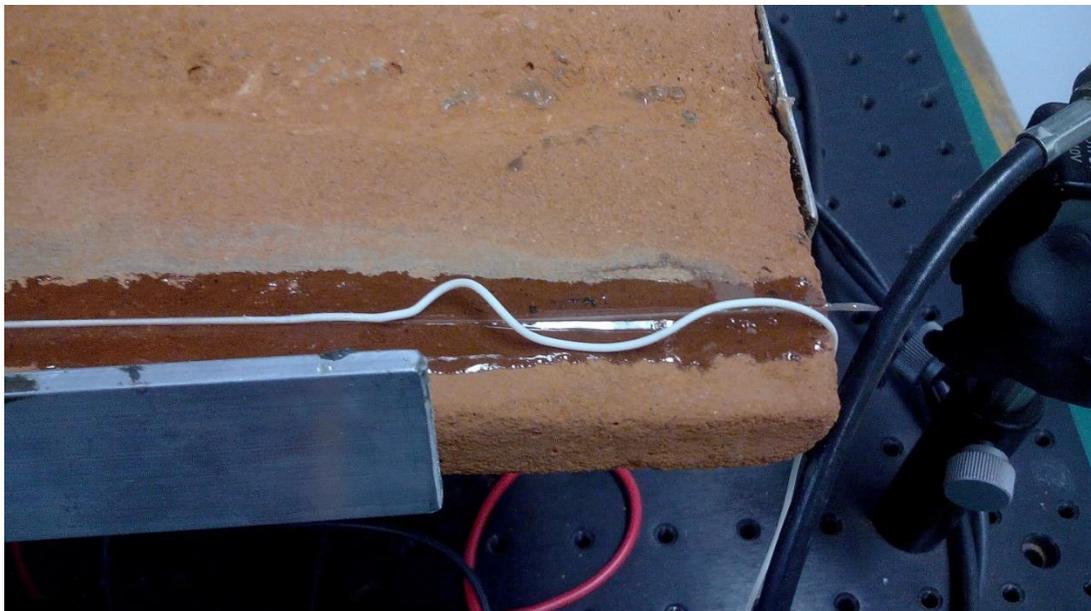
Se observa cómo se desplazó por el pegamento hasta salir totalmente del pegamento en el extremo de la instalación.

ANEXO K

EXPERIMENTO CON FIBRA JUMPER MULTIMODO 62.5/125 SIN RECUBRIMIENTO EXTERNO, PEGAMENTO EPOXY



Se observa que si se desplaza la fibra en este caso hay una separación entre los tabiques de $\Delta = 91.92$ mm



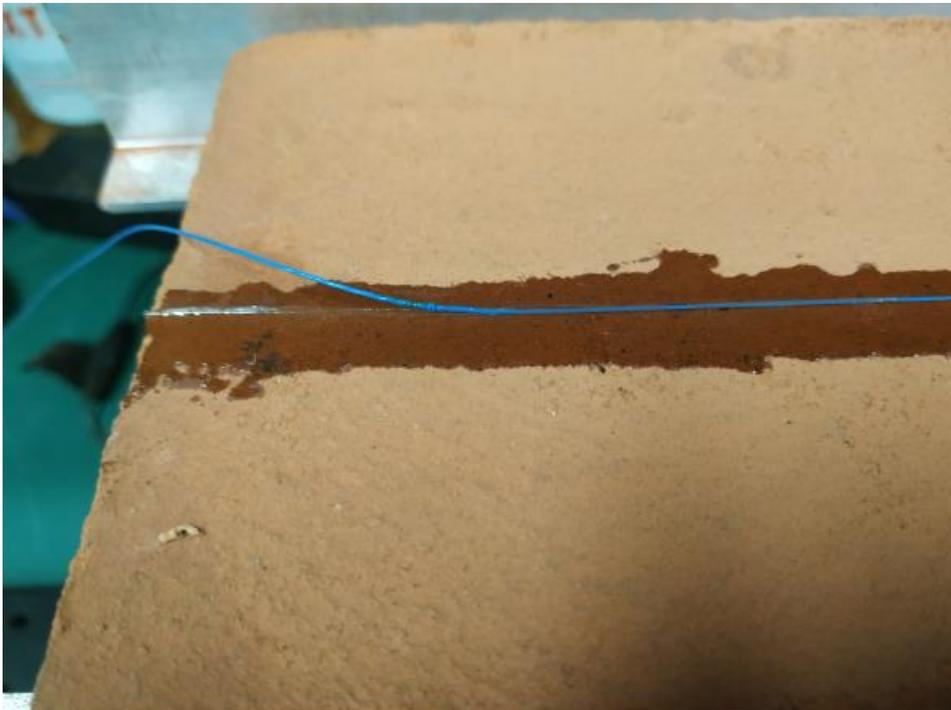
Se observa el extremo derecho de la instalación como se salió la fibra del pegamento al irse desplazando.

ANEXO L

EXPERIMENTO CON FIBRA ÓPTICA FP200ERT, PEGAMENTO EPOXY



Se observa que si se desplaza la fibra en este caso hay una separación entre los tabiques de $\Delta = 160.2$ mm.



Se observa el extremo izquierdo de la instalación como se salió la fibra del pegamento al irse desplazando.